



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN EL ÁREA URBANA DE
LA CIUDAD DE PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

AUTORES:

PILAY POZO EDWIN LUIS
SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR

TUTOR:

PROF. KERVIN CHUNGA

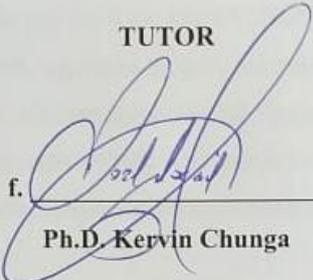
La Libertad, Ecuador

2019

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **PILAY POZO EDWIN LUIS Y SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR**, como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**.

TUTOR

f. 

Ph.D. Kervin Chunga

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. 

Arq. Gilda Rubira Infante

La Libertad, a los 07 días del mes de febrero del año 2019



APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación "CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN EL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA", elaborado por los Sres. PILAY POZO EDWIN LUIS Y SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR, egresado de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingenieros Civiles, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR

f.

Ph.D. Kervin Chunga

La Libertad, a los 07 días del mes de febrero del año 2019



RECIBIDO 01 MAR 2019

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, PILAY POZO EDWIN LUIS Y SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR

DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, **caracterización geotécnica y microzonificación sísmica en el área urbana de la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 07 días del mes de febrero del año 2019

EL AUTOR

f. 

Pilay Pozo Edwin Luis

f. 

Solano Mejillón Víctor Omar

AUTORIZACIÓN

Nosotros, PILAY POZO EDWIN LUIS Y SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR

Autorizamos a la Universidad Península de Santa Elena a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Caracterización geotécnica y microzonificación sísmica en el área urbana de la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los 07 días del mes de febrero del año 2019

EL AUTOR:

f.



Pilay Pozo Edwin Luis

f.



Solano Mejillón Víctor Omar

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO



Universidad Estatal
Península de Santa Elena

Biblioteca General

La Libertad, 07 de febrero de 2019

CERTIFICADO ANTIPLAGIO

001-TUTOR KACM-2019

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado "Caracterización geotécnica y microzonificación sísmica en el área urbana de la ciudad de Pelileo, provincia de Tungurahua", elaborado por los estudiantes PILAY POZO EDWIN LUIS y SOLANO MEJILLÓN VÍCTOR OMAR, egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido los requerimientos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con **9%** de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto reporte de similitud.

Atentamente,

Prof. Kervin Chunga Morán, Ph.D.

C.I.:0916917297

DOCENTE TUTOR

f UPSEec

@UPSE_ec

UPSE_ec

UPSE Santa Elena

UPSE noticias

flickr.com/upse

www.upse.edu.ec / biblioteca@upse.edu.ec

tlainez@upse.edu.ec

(04) 2-781704 ext. 136

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a Dios por ser mi guía durante todo este año de estudio y por haber permitido que hoy cumpla una parte importante de mi vida, haber logrado la meta que me propuse, a Pilay Rosales Matilde Magdalena que me guía desde el cielo cada paso que dado y así lograr ser un ingeniero civil.

A mis padres, y hermanos por el apoyo y colaboración incondicional a lo largo de la carrera.

A nuestro Tutor de Tesis, el Doctor Kervin Chunga por su ayuda, enseñanza y colaboración, durante todo el tiempo de preparación de tesis.

A la UPSE, por acogerme en sus aulas durante todo este tiempo universitario, a los ingenieros catedráticos por las enseñanzas dadas durante todo este tiempo.

A RISK SAFETY por permitirnos usar información importante para nuestro trabajo de investigación, y al GAD municipal de Pelileo.

Edwin Luis Pilay Pozo

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo incondicional que me brindan.

Al personal de la empresa Risk & Safety por ayudarnos con la información y los resultados obtenidos de los estudios geofísicos y geomecánicos realizados en la ciudad Pelileo.

Al Doctor Kervin Chunga por haber logrado los nexos para realizar la presente investigación con la empresa Risk & Safety y GAD Municipal de Pelileo.

A todos quienes aportaron en este proceso de preparación profesional.

Solano Mejillón Víctor Omar

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo brindado, por haber sido mi guía y enseñarme el camino correcto al éxito.

Edwin Luis Pilay Pozo

DEDICATORIA

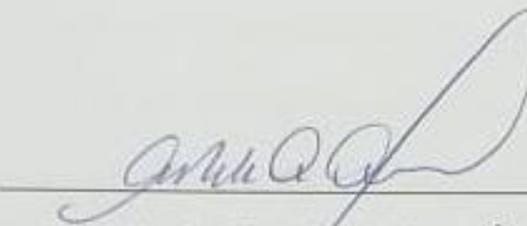
A mis padres y familia por su apoyo incondicional.

Solano Mejillón Víctor Omar

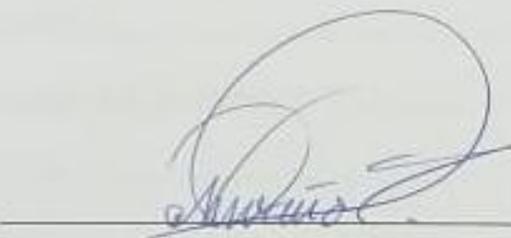
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

ING. JUAN FRANCISCO GARCÉS VARGAS
DECANO DE LA FACULTAD

f. 

ARQ. GILDA RUBIRA GÓMEZ
DIRECTOR DE CARRERA

f. 

ING. GASTÓN PROAÑO
COORDINADOR O DOCENTE DEL ÁREA

f. 

ABG. VÍCTOR CORONEL
SECRETARIO GENERAL

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	vii
DEDICATORIA	ix
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	¡Error! Marcador no definido.
INDICE GENERAL.....	xii
INDICE DE TABLAS	xvi
INDICE DE FIGURAS.....	xvii
ANEXO.....	xxi
RESUMEN.....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1. Generalidades	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
1.5. Alcance	5
1.6. Contexto geográfico del cantón Pelileo.....	6
1.6.1. Historia e información general.....	6
1.6.2. Aspectos Demográficos	7
1.6.3. Aspectos económicos	8
CAPÍTULO II	11
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO, GEOLOGÍA DE VOLCANES Y SISMOTECTÓNICA.....	11
2. Descripción del área de estudio.....	11
2.1. Caracterización geotécnica.....	13

2.2.	Geología del cantón Pelileo.....	14
2.2.1.	Volcánicos de Huisla Mumul, Igualata, Chiquicha y Sagoatoa (Plioceno).....	15
2.2.2.	Lavas del Carahuairazo y Piroclastos del Chimborazo (Pleistoceno)..	15
2.2.3.	Formación Latacunga (Pleistoceno).....	15
2.2.4.	Formación Cangagua (Cuaternario).....	15
2.2.5.	Depósitos superficiales (Holoceno)	16
2.3.	Sismotectónica y sismos corticales	16
2.3.1.	Sismicidad histórica asociada a fallas geológicas corticales	17
2.4.	Peligros volcánicos en el cantón Pelileo	21
2.4.1.	Peligros volcánicos y tipos de unidades volcánicas en el terreno.....	21
2.4.2.	Historia volcánica y afectación en los suelos de Pelileo.....	23
CAPÍTULO III.....		27
METODOLOGIA Y FASES DE INVESTIGACIÓN		27
3.	Fases de Investigación.....	27
3.1.	Fase 1. Caracterización de fallas geológicas y geología de volcanes.....	27
3.2.	Fase 2. Prospección geotécnica y sísmica Vs30.....	29
3.2.1.	Ensayos de laboratorio	30
3.2.2.	Clasificación de suelos con el método SUCS.	30
3.2.3.	Límites de Atterberg	31
3.2.4.	Parámetros mecánicos del suelo.....	33
3.2.5.	Parámetros físicos del suelo	34
3.2.6.	Determinación de los períodos de vibración del suelo utilizando el método Nakamura	34
3.2.7.	Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico.....	35
3.2.8.	Método Nakamura.....	36
3.2.9.	Geodinámica y sus relaciones	37
3.2.10.	Ensayo y datos obtenidos en campo.....	38

3.2.11.	Tipos de normas de construcción con parámetros sísmicos.....	38
3.2.12.	Clasificación de Suelos del Euro código.....	40
3.2.13.	Método Sísmico	41
3.2.14.	Sitios de ensayo.....	44
3.2.15.	Sector Mercado Mayorista LS3	44
3.3.	Fase 3. Peligrosidad sísmica y respuesta de sitio.	46
3.3.1.	Espectro de diseño NEC-2015	46
3.3.2.	Zonificación Sísmica del NEC-15	46
3.3.3.	Coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d y F_s de acuerdo a la NEC.	48
3.3.4.	Componentes horizontales de la carga sísmica: espectros elásticos de diseño	49
3.3.5.	Espectro elástico de diseño en desplazamientos	50
3.4.	Fase 4. Estudio de licuefacción para el cantón Pelileo.....	51
3.4.1.	Susceptibilidad geotécnica para suelos D, E y F.....	51
3.4.2.	Factores que influyen en el potencial de licuefacción.	51
CAPITULO IV		53
CARACTERIZACIÓN DE FALLAS SÍSMICAS Y GEOTÉCNICA VOLCÁNICA		53
4.	Mapa de zonación sísmica por fallas geológicas	53
4.1.	Catálogo de fallas sísmicas y máximas M_w y PGA roca.....	53
4.1.1.	Zonación Morfoestructural – Método Determinístico	56
4.1.2.	Reconocimiento de Nudos Sismogénicos	57
4.2.	Mapa de zonación geológica - geotécnica.....	60
4.2.1.	Estratigrafía de suelos volcánicos de Pelileo	60
CAPITULO V.....		64
RESULTADOS.....		64
5.	Resultados	64

5.1.	Estructuras Sismogénicos (fuentes sísmicas) corticales capaces de generar sismos con $M \geq 6$ y con efecto de daños severos en el cantón Pelileo	64
5.2.	Características geológicas y geotécnicas de los depósitos cuaternarios.....	65
5.3.	Períodos de vibración del suelo utilizando el método Nakamura, en el cantón Pelileo.....	69
5.3.1.	P01 parque héroes de Paquisha (Sector Pelileo Nuevo)	69
5.3.2.	P02 sector mercado mayorista (Sector Pelileo Viejo).....	70
5.3.3.	Resumen de los resultados obtenidos.....	71
5.4.	Velocidades de la Onda de Corte (V_{s30}) por medio de estudios geofísicos para suelos geotécnicos característicos en el cantón Pelileo.....	72
5.4.1.	P01 Parque Héroes de Paquisha (Sector Pelileo Nuevo)	72
5.4.2.	P2 Sector Mercado Mayorista (Sector Pelileo Viejo).....	76
5.4.3.	Correlación de perfiles sísmicos	80
5.5.	Espectro de diseño. Desarrollo de gráficos NEC 2015	80
5.6.	Susceptibilidad de fenómeno de licuefacción en el cantón Pelileo.....	82
	CAPITULO VI.....	87
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
6.1.	CONCLUSIONES	87
6.2.	RECOMENDACIONES	88
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	ANEXOS.....	91

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Números de habitantes por parroquia	8
Tabla 1.2	PEA por sectores económicos	9
Tabla 2.1	Detalles de profundidad y revestimiento	14
Tabla 2.2	Detalles de coordenadas y fecha	14
Tabla 2.3	Terremotos en la región Interandina central del Ecuador intensidades > VIII	18
Tabla 3.1	Símbolos de grupo clasificación SUCS incluyendo Prefijos y Sufijos.....	32
Tabla 3.2	Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico.....	35
Tabla 3.3	Clasificación de perfiles sísmicos de suelos basada en la velocidad de ondas de corte NEC-15.....	39
Tabla 3.4	Clasificación de Suelos del Euro código.....	40
Tabla 3.5	Sitios de ensayo.....	45
Tabla 3.6	Ubicación sondeos sísmicos	46
Tabla 3.7	Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada.....	47
Tabla 3.8	Tipo de suelo y Factores de sitio Fa.....	48
Tabla 3.9	Tipo de suelo y Factores de sitio Fd	48
Tabla 3.10	Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo Fs.....	49
Tabla 3.11	Comparación de registros históricos de suelos involucrados en licuefacción	52
Tabla 4.1	Catálogo de fallas geológicas sísmicas delineadas en el territorio cercano a Pelileo, estimando Mw y PGA roca.....	55
Tabla 4.2	Parámetros morfo-estructurales de discretización obtenidos en este estudio desde la aplicación de la técnica “Pattern Recognition”	60
Tabla 5.1	Fallas sísmicas con niveles de actividad moderada y alta	65
Tabla 5.2	Valores de f_{peak} , A_{peak} , y Períodos de los suelos de Pelileo	72
Tabla 5.3	Coordenadas de las líneas sísmicas en P01 Parque Héroes de paquisha ...	73
Tabla 5.4	Coordenadas de las líneas sísmicas en P02 Sector Mercado Central	76
Tabla 5.5	Clasificación de perfil sísmico para Pelileo, de acuerdo al Vs30	80
Tabla 5.6	Valores de índice de plasticidad.....	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Población del área urbana y rural del cantón San Pedro de Pelileo según los censos 2001 y 2010 (Fuente INEC 2010)	8
Figura 1.2 PEA por sectores económicos (Fuente SNI)	10
Figura 2.1 Ubicación del área de estudio de la ciudad de Pelileo y su proximidad a la ciudad de Ambato.	11
Figura 2.2 P01 Parque Héroes de Paquisha	12
Figura 2.3 P02 Mercado mayorista o Pelileo viejo	12
Figura 2.4 Distancia aproximada entre perforaciones (P01 Y P02) estudiadas.....	13
Figura 2.5 Imagen de antigua ciudad de Pelileo y ruinas de la Iglesia de Santa Rosa, provincia de Tungurahua. Fuente: USGS	19
Figura 2.6 Isosistas del sismo del 5 de agosto de 1949 (Imagen proporcionada por José Egred al Director de esta tesis de grado, para estudios académicos).....	20
Figura 2.7 Diseños esquemáticos de secciones proximales, mediana y distales de avalanchas de escombros y detritos (Takarada y otros, 1999 mod.).....	23
Figura 2.8 Principales eventos volcánicos eruptivos de Tungurahua (Hall y otros, 1999)	24
Figura 2.9 Depósitos de avalanchas y lahares desde el volcán Huisla para el poblado de Pelileo. Fuente: Espín-Bedón et al., 2018. Los suelos de Pelileo tienen procedencia de materiales transportados desde los volcanes Huisla y Tungurahua.	25
Figura 3.1 Acción de perforaciones geotécnicas P-01 (posición izquierda) y P02 (posición derecha).	29
Figura 3.2 Definición de los límites de Atterberg (Braja M, 2011).....	31
Figura 3.3 Sistema unificado de clasificación de suelos.....	33
Figura 3.4 Ensayo sísmica de refracción.....	42
Figura 3.5 Esquema de configuración activa lineal	43
Figura 3.6 Esquema de la configuración para dispersión lineal de fuente pasiva.....	43
Figura 3.7 Ubicación de las líneas sísmicas en LS1 PARQUE HEROES DE PAQUISHA	44
Figura 3.8 Ubicación de las líneas sísmicas en LS2 PARQUE HEROES DE PAQUISHA	44
Figura 3.9 Ubicación de las líneas sísmicas en LS3 SECTOR MERCADO MAYORISTA.....	45

Figura 3.10 Ubicación de las líneas sísmicas en LS4 SECTOR MERCADO MAYORISTA.....	45
Figura 3.11 Zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (NEC, 2015).....	47
Figura 3.12 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño (NEC, 2015).....	50
Figura 3.13 : Espectro sísmico elástico de desplazamientos para diseño (NEC, 2015).....	50
Figura 4.1 Fallas geológicas activas y capaces de generar sismos con magnitud mayor a 6. Sismos superficiales son distribuidos espacialmente en el terreno, de fecha posterior al 16 de abril 2016, posible asociación con actividades de fallas geológicas por su poca profundidad hipocentral. Perforaciones geotécnicas son indicadas en este mapa para la población de Pelileo.....	54
Figura 4.2 Construcción de un modelo de zonación morfo-estructural para la ciudad de Pelileo considerando 50 km y 20 km de radio.	57
Figura 4.3 Sector relleno sanitario, en la parte baja del poblado de Pelileo, donde se pueden observar las alternancias de lahares con niveles de caídas de cenizas blanquecinas.....	61
Figura 4.4 Techo de la secuencia estratigráfica de Pelileo con alternancia de lahares por encima de nivel de lapillos de caída. En la foto el tutor Prof. Kervin Chunga....	62
Figura 4.5 Secuencia de lapillos negros relacionados a erupción de Tungurahua....	63
Figura 5.1 Construcción de un modelo de zonación morfo-estructural para la ciudad de Pelileo considerando 50 km y 20 km de radio.	64
Figura 5.2 Estratigrafía del cantón Pelileo, perforación P01 Parque Héroes de Paquisha	67
Figura 5.3 Estratigrafía del cantón Pelileo, perforación P02 Sector Mercado Mayorista	69
Figura 5.4 Señales sísmicas obtenidas en el punto P01	70
Figura 5.5 Sitio Parque Héroes de Paquisha. Espectros de Fourier	70
Figura 5.6 Señales sísmicas obtenidas en el punto P02	71
Figura 5.7 Sitio Sector Mercado Mayorista. Espectros de Fourier	71
Figura 5.8 Ubicación del sitio seleccionado para el estudio de sísmica de refracción Parque Héroes de Paquisha	73

Figura 5.9 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1	73
Figura 5.10 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2.....	74
Figura 5.11 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1	74
Figura 5.12 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2.....	75
Figura 5.13 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1	75
Figura 5.14 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2.....	76
Figura 5.15 Ubicación del sitio seleccionado para el estudio de sísmica de refracción Sector Mercado Central.....	77
Figura 5.16 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3	77
Figura 5.17 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4.....	78
Figura 5.18 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3.....	78
Figura 5.19 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4.....	79
Figura 5.20 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3.....	79
Figura 5.21 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4.....	80
Figura 5.22 Espectro horizontal para suelo tipo C	81
Figura 5.23 Espectro horizontal para suelo tipo D.....	81
Figura 5.24 Espectro en desplazamiento para suelo tipo C	82
Figura 5.25 Espectro en desplazamiento para suelo tipo D	82
Figura 5.26 Relación límite líquido vs límite plástico	84
Figura 5.27 Mapa de Microzonificación sísmica del cantón Pelileo y sus niveles de Mw.	85

Figura 5.28 Mapa de Microzonificación sísmica del cantón Pelileo para propósito de diseño y valor de factor de zona con respecto a sus niveles de PGA..... 86

ANEXO

Anexo 1 Clasificación se los suelos de Pelileo P01, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	91
Anexo 2 Resumen de Resultados obtenidos en la perforación P02 de acuerdo a la SUCS en el cantón Pelileo	92
Anexo 3 NSPT vs Profundidad	93
Anexo 4 Relación NSPT y ángulo de fricción	93
Anexo 5 Ángulo de fricción vs Profundidad.....	94
Anexo 6 Contenido de humedad vs Profundidad.....	95

“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN EL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE PELILEO, PROVINCIA DE TUNGURAHUA”

Autores: Pilay Pozo Edwin Luis

Solano Mejillón Víctor Omar

Tutor: Ph.D. Kervin Chunga

RESUMEN

La caracterización geotécnica y el análisis de los datos del estudio de microzonificación sísmica en las áreas urbanas de la ciudad Pelileo, considera la clasificación del suelo según las velocidades de ondas de corte utilizando la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC15) y el Euro Código, para poder realizar un perfil estratigráfico de los suelos de acuerdo a las propiedades geofísicas de las muestras tomadas en las perforaciones realizadas.

Esta investigación comprende la realización de varias etapas desde una recopilación bibliográfica hasta un análisis de los resultados de los estudios geológicos, geofísicos, y geomecánicos realizados en el lugar.

De la ciudad de Pelileo se obtuvo resultados de estudios geotécnicos y geofísicos realizados en dos puntos de la ciudad, obteniendo muestras y datos para realizar la estratigrafía del lugar hasta una profundidad de 30 metros, además utilizando procedimientos, para de una manera empírica conocer de acuerdo a las fallas geológicas que cruzan o están cerca de la ciudad, una magnitud estimada de un sismo que la ciudad puede sufrir, de la misma manera conocer la susceptibilidad que poseen los suelos de la ciudad para que ocurra el fenómeno de licuefacción.

El cantón Pelileo muestra un alto grado de homogeneidad en el subsuelo determinada por los registros en las velocidades de corte y periodo de suelo de cada perfil geológico obtenidos a partir de los sondeos, además de los resultados obtenidos por ensayos geotécnicos y geomecánicos.

Palabras claves: fallas geología, suelos de cenizas volcánicas, licuefacción de suelos, estudios geofísicos.

ABSTRACT

The geotechnical characterization and the analysis of the seismic microzonation study data in the urban areas of the Pelileo city, considers the classification of the soil according to the cutting wave velocities using the Ecuadorian Construction Standard (NEC15) and the Euro Code, to be able to make a stratigraphic profile of the soils according to the geophysical properties of the samples taken in the perforations made.

This investigation includes the accomplishment of several stages from a bibliographic compilation to an analysis of the results of the geological, geophysical, and geomechanical studies carried out in the place.

From the city of Pelileo we obtained results of geotechnical and geophysical studies carried out in two points of the city, obtaining samples and data to perform the stratigraphy of the place up to a depth of 30 meters, also using procedures, in an empirical way to know in accordance to the geological faults that cross or are close to the city, an estimated magnitude of an earthquake that the city can suffer, in the same way to know the susceptibility that have the soils of the city for the phenomenon of liquefaction to occur.

The Pelileo canton shows a high degree of homogeneity in the subsoil determined by the records in the cutting speeds and soil period of each geological profile obtained from the soundings, in addition to the results obtained by geotechnical and geomechanical tests.

Keywords: geology faults, volcanic ash floors, soil liquefaction, geophysical studies

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. Generalidades

Toda obra civil, necesita planificación técnica para prever errores o prevenir accidentes que causen costos económicos, materiales o personales. Antes de comenzar cualquier proyecto, es necesario estudiar las características del terreno, así como el subsuelo; en caso de realizar una obra de edificación, es prioritario hacer una caracterización y reconocimiento del mismo. Es por ello que, siempre es recomendable, analizar geotécnicamente los tipos de suelos y el comportamiento geomecánico de las rocas.

La caracterización geotécnica comprende el análisis de las propiedades de suelos y roca, que inciden directa o indirectamente en su estabilidad, dentro de este análisis se considera al macizo rocoso, como constituido por una serie de bloques de roca separados por discontinuidades. Las discontinuidades corresponden a diaclasas, fracturas, planos de estratificación, fallas, etc. mientras que los bloques generados, están constituidos por materiales geológicos, los cuales están afectados, por procesos de mineralización, alteración e intemperización. Los tipos de suelo del cantón Pelileo son suelos de origen volcánico, Inceptisoles Andepts, de color negro, arenosos y de profundidad variable, en menor proporción.

La microzonificación sísmica es considerada como la metodología de trabajo adecuada para utilizarse en la reducción de los peligros geológicos generados de la amenaza sísmica con afectación severa en ciudades. El proyecto de microzonificación sísmica consiste en evaluar los niveles de amenaza sísmica y los efectos locales probables (efectos en sitio), lo que permite la implementación de estrategias que tomen en cuenta estas condiciones regionales y locales del suelo, responsables para la modificación de la respuesta sísmica en una ciudad. Para ello se analizan con un enfoque multidisciplinario tanto los datos disponibles del subsuelo, como los nuevos estudios realizados.

En este estudio se ejecutará una microzonificación en el poblado de Pelileo (sectores Pelileo Viejo y Pelileo Nuevo), comparando la geología y geomorfología

para delimitar zonas de similar respuesta sísmica, en particular suelos recientes. Con ensayos geofísicos recopilados de ciertos sectores de la zona de estudio se realiza el análisis de los resultados dados por la microzonificación del lugar, de la velocidad de onda de corte V_s , proporcionada de los ensayos se comparará resultados con los perfiles de respuesta sísmica de la NEC-2015.

Tema importante que también se tratará en esta investigación es la licuefacción del suelo, debido a que es una de las principales causas de daños en las estructuras en los depósitos de arena suelta saturada durante los terremotos. De hecho, sedimentos de tamaño de la arena suelta, tienden a comprimirse bajo la carga cíclica impuesta por la sacudida del terremoto, que puede transferir el estrés normal de la matriz de arena al agua de los poros, si el suelo está saturado y en gran medida no puede drenar durante la carga cíclica. Por lo tanto, se produce una reducción del esfuerzo de confinamiento efectivo dentro del suelo y una pérdida asociada de resistencia y rigidez que contribuye, en consecuencia, a la deformación del depósito del suelo. Los terremotos anteriores registrado en el Ecuador mostraron cómo la licuefacción del suelo puede ser perjudicial para edificios, puentes, ferrocarriles, puertos y otras infraestructuras. La licuefacción del suelo se ha observado, históricamente, durante terremotos moderados y fuertes (Ambraseys, 1988).

Esto permitirá brindar como aporte a la sociedad mapas de zonificación del cantón Pelileo que permita identificar las zonas de mayor peligrosidad sísmica, lo cual es necesario para establecer para cada tipo de perfil del suelo un espectro elástico horizontal de diseño, en aceleraciones para el diseño de estructuras sismo resistente brindando seguridad a los habitantes.

1.1. Antecedentes

En las últimas décadas en el territorio ecuatoriano han ocurrido varios fenómenos de origen natural y antrópicos (ser humano) de gran magnitud y extensión, que fueron ocasionalmente catastróficos y cuyo carácter destructivo causó graves desequilibrios socioeconómicos y ambientales. Entre estos eventos se tiene procesos eruptivos de volcanes, inundaciones, deslizamientos, sismos, incendios, explosiones, entre otros que han afectado el desarrollo de las localidades del país.

El evento sísmico ocurrido el 16 de abril del 2016 ha dejado en evidencia la elevada sismicidad que posee nuestro país Ecuador. Históricamente, en el cantón

Pelileo de la provincia de Tungurahua, el 5 de agosto de 1949 ocurrió uno de los sismos que más desastres ha causado en nuestro país, es el desastre relacionado con un fenómeno natural más importante en la historia contemporánea de Ecuador, este sismo tuvo una intensidad macrosísmica de X y Magnitud 6.2.

Sin duda estos acontecimientos, el crecimiento de la población y el aumento de la demanda constructiva, hacen muy notorio la necesidad de contar con estudios de peligro sísmico, estos estudios en la actualidad han adquirido una gran relevancia, además de la gran importancia de conocer las características estratigráficas del terreno para poder realizar un mejor diseño sismo resistente. Los estudios de microzonificación sísmica, en la actualidad han adquirido un gran auge, debido a que estos estudios permiten implementar normas locales de diseño, para poder reducir o evitar pérdidas económicas o humanas ante la ocurrencia de un sismo.

1.2. Planteamiento del problema

Debido a los últimos acontecimientos telúricos que se han suscitado en el Ecuador, todo tipo de construcción deben contar con un estudio geotécnico que, en base a investigaciones de campo, perforaciones, ensayos de laboratorio e interpretación de resultados, formulen recomendaciones constructivas y de cimentación de la obra, que cumplan con las ordenanzas municipales y la Norma ecuatoriana de la construcción.

Por falta de conocimiento y estudios, uno de los causantes a que la población se vea afectada al momento de que ocurra un fenómeno natural, es el hombre, varios habitantes del Cantón Pelileo, se han dedicado a la explotación de piedra pómez y material pétreo, lo cuales son utilizados para la elaboración de bloques en el primer caso y para construcciones en el segundo, Sin embargo, la explotación artesanal sin ninguna tecnología ni normas técnicas ambientales, han provocado daños al suelo como es el caso de los deslizamientos y agrietamientos.

Haciendo un análisis de las dos zonas a evaluar, (Pelileo Nuevo y Pelileo Viejo), no cuenta con un estudio geológico y/o una caracterización geotécnica, que determinen en cierta forma sus potencialidades y restricciones, frente al uso adecuado del suelo y el conveniente aprovechamiento de sus recursos disponibles, permitiendo la posible construcción de obras de infraestructura y desarrollo vial, entre otros.

Según los datos científicos los terremotos tienen un ciclo de activación de 100 años, y en el último terremoto del 1949, Pelileo desapareció dejando desolación, dolor y cientos de familias sin sus hogares, esto se debe a que Tungurahua y el cantón Pelileo se encuentran ubicada cerca de una falla geológica, a esto se suma la falta de concienciación de las personas al momento de construir. Estos peligros naturales por la ubicación geográfica del cantón hace reflexionar sobre la importancia de saber cuan seguro es el cantón Pelileo ante un terremoto, es por esto que es de mucha importancia para el cantón realizar la caracterización del tipo de suelo y obtener los parámetros necesarios, que deben seguir para hacer de Pelileo una ciudad capaz de resistir un sismo de la misma magnitud del año 1949, y que no se tenga que vivir aquel evento desastroso y doloroso que llevo a la perdida de seres queridos y de viviendas en general.

1.3. Justificación.

En todo el mundo, durante las últimas décadas, la zonificación de riesgo de licuefacción se convirtió en uno de los primeros pasos en cada análisis de riesgo sísmico y estrategia de mitigación en áreas urbanas. Puede constituir una guía útil para una futura planificación del desarrollo del urbanismo en áreas propensas a la licuefacción, y un desafío importante para desarrollar políticas adecuadas de gestión de desastres. El riesgo de licuefacción corresponde a la probabilidad de ocurrencia de licuefacción en un área determinada dentro de un período de tiempo de referencia (Varnes, 1984), lo que significa la identificación de áreas con alta probabilidad de deformación en el suelo inducida por licuefacción, que se encuentra entre las causas de daños durante terremotos.

La realización de este proyecto de grado radica en la importancia que tiene para el gremio de la construcción, conocer el tipo de suelo, las características geofísicas, donde van a realizar la construcción o para la elaboración de un proyecto, además de tener la información acerca de las intensidades sísmicas que posee el lugar mediante mapa de microzonificación en donde se podrá determinar zonas de alta peligrosidad sísmica brindando seguridad a sus habitantes.

Con esta investigación se pretende crear un documento que sirva como base a los profesionales de la Ingeniería Civil para que conozcan la caracterización de los

suelos de zonas urbanas cantón Pelileo, además de la determinación de los parámetros de diseño para las construcciones sismo resistente.

El estudio geológico geotécnico del subsuelo es un pilar fundamental en la construcción de estas obras de ingeniería, debido a que la presencia de problemas geotécnicos implica la adopción de soluciones en general más costosas, por otro lado, unas condiciones geotécnicas favorables, proporcionan no solo una mayor seguridad a las obras, sino un desarrollo de las mismas sin imprevistos, lo que influye significativamente en los costos y plazos de ejecución. Por lo que es necesario realizar el estudio geológico-geotécnico del subsuelo para conocer las propiedades geomecánicas de los terrenos por donde se implantarán las obras de ingeniería.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Clasificar los tipos de suelos volcánicos geotécnicos y su asociación con efectos geológicos cosísmicos de licuefacción en el área urbana de la ciudad de Pelileo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las estructuras sismogénicas (fuentes sísmicas) corticales capaces de generar sismos con $M \geq 6$ y con efecto de daños severos en el área epicentral.
- Delinear los tipos de suelos geotécnicos en el subsuelo desde datos geológicos (estratigráficos, litológicos, geomorfológicos) y geofísicos (sísmica de refracción y periodo de vibración), y su asociación con la NEC-15.
- Determinar espectros de diseños para tipos de suelos geotécnicos C y D, característicos en Pelileo de acuerdo a los parámetros que indica la norma NEC-15.

1.5. Alcance

Para la construcción de las cimentaciones de un edificio, se debe determinar e identificar previamente el tipo de suelo. Los procedimientos de cálculo de las cimentaciones, ya sean éstas superficiales o profundas, están directamente relacionadas con la clasificación del terreno, ya sea éste un suelo granular o cohesivo o rocoso.

Los estudios geotécnicos son el compendio de información cuantificada en cuanto a las características del terreno en relación con la tipología del edificio previsto y el entorno donde se ubica, que es necesaria para proceder al análisis y dimensionado de los cimientos de esta u otras obras. Las características del terreno de apoyo se determinarán mediante una serie de actividades que en su conjunto se denomina reconocimiento del terreno y cuyos resultados quedarán reflejados en el informe correspondiente que se integrará en el estudio geotécnico.

Los puntos de ensayo se encuentran en el cantón Pelileo y fueron seleccionados no por su ubicación, sino más bien por los diferentes tipos de suelos que se encontraron en cada uno de estos puntos.

1.6. Contexto geográfico del cantón Pelileo

El cantón Pelileo exhibe una geografía accidentada y variada en sus rasgos geomorfológicos, con grandes diferencias de nivel y cotas, entre valles estrechos y laderas inestables de montañas y volcanes (Huisla y Tungurahua). La altitud promedio cantonal es de 2.900 m.s.n.m. (metros sobre nivel de mar); el punto más alto es el cerro Teligote con 3.400 m.s.n.m. y el punto más bajo es el valle de Chiquicha con 2.400 m.s.n.m. Laderas inestables son evidentes en el área de estudio asociadas a suelos transportados de lahares, suelos y de fácil remoción, los cuales presentan desprendimientos y activación durante los meses de precipitación y por actividad sísmica local de alguna falla geológica próxima a la ciudad, en un radio de 30 km.

1.6.1. Historia e información general

El nombre Pelileo tiene su origen en el idioma panzaleo, y sus posibles significados son: "Laguna grande", "Cacique poderoso" o "Fuerte como el rayo". San Pedro de Pelileo fue fundado por la corona española en 1570, por Antonio Clavijo y se constituyó como cantón el 22 de julio de 1860, posterior a esta fecha en los años 70's logra consolidarse como una organización política y administrativa. En cuanto a los hechos históricos en el ámbito biofísico que han marcado el desarrollo del cantón, están los fenómenos sísmicos y volcánicos que han sido acompañantes constantes de sus pobladores, hechos que han permitido fortalecer el espíritu de todos sus habitantes. En referencia a los eventos sísmicos, todos asociados a las activaciones de fallas geológicas cercanas, se documenta daños en la población en los años 1698, 1797, 1840 y finalmente el 5 de agosto de 1949, esta última, en que el poblado prácticamente

desapareció, y que marcó un antes y después del suceso. Según cuenta la población sobreviviente, en el lugar lo único que se podía observar era un pilar de roca volcánica que fue parte de la iglesia central del cantón. En el caso de los procesos volcánicos que se relacionan principalmente para las provincias de Cotopaxi y Tungurahua, son documentados en los años, 1534 – 1557; 1640 – 1777; 1857 – 1886; 1900 – 1916, 1999 – hasta la actualidad). Los volcanes con mayor afectación para la ciudad de Pelileo, son el Huisla (inactivo, pero con alto nivel de riesgo por deslizamientos de lahares) y el Tungurahua (activo y con riesgo por caída de cenizas).

Antes del terremoto de 1949, la población central de Pelileo se asentaba en donde hoy se conoce como Pelileo Grande o Pelileo Viejo. Debido a la deformación del terreno y daño casi total de las viviendas, decidieron reconstruir en la zona alta (Pelileo Nuevo, actual centro de la ciudad), sitio en el que ahora se puede mirar grandes edificios, locales comerciales entre otros. Esto es un reflejo de la perseverancia de un pueblo que, pese a ser afectado por un devastador sismo supo renacer debajo de los escombros, salir adelante y alcanzar un fructífero desarrollo económico y social.

El cantón está conformado por ocho parroquias rurales que son: Benítez, Bolívar, Cotaló, Chiquicha, El Rosario, García Moreno, Huambaló y Salasaca, y dos parroquias urbanas que son Pelileo (Nuevo) y Pelileo Grande.

1.6.2. Aspectos Demográficos

La población del cantón San Pedro de Pelileo de acuerdo con el censo de población y vivienda 2010, es de 56.573 habitantes, distribuida en 27.327 hombres y 29.246 mujeres, según la población registrada en el censo del año 2010, con relación a los 48.988 habitantes registrados en el censo del año 2001, se determina una tasa de crecimiento de 1,30% anual. El cantón tiene una superficie de 202 km².

De acuerdo con el censo del año 2001, la población asentada en el área urbana es de 9.051 habitantes que corresponde al 18,48% y la rural es de 39.937 habitantes, igual al 81,52%; según la información del censo 2010, la mayor parte de la población continua en el área rural con 46.470 habitantes (82,14%) y en el área urbana, los 10.103 restantes (17,85%). Lo cual permite determinar que la mayor parte de la población de Pelileo, corresponde al área rural. El área rural comprende ocho parroquias y la cabecera cantonal. En la tabla 1.1 y figura 1.1 se describe los resultados del censo de población del año 2001 y 2010 según la INEC.

Tabla 1.1
Números de habitantes por parroquia

Parroquia	Población 2010	Porcentaje
Benítez	2.183	3,86
Bolívar	2.713	4,8
Chiquicha	2.445	4,32
Cotaló	1.852	3,27
El Rosario	2.638	4,66
García Moreno	6.380	11,28
Huambaló	7.862	13,9
Pelileo (cabecera cantonal)	24.614	43,51
Salasaca	5.886	10,4
Total	56.573 hab.	100%

Fuente: Censo de Población 2010-INEC

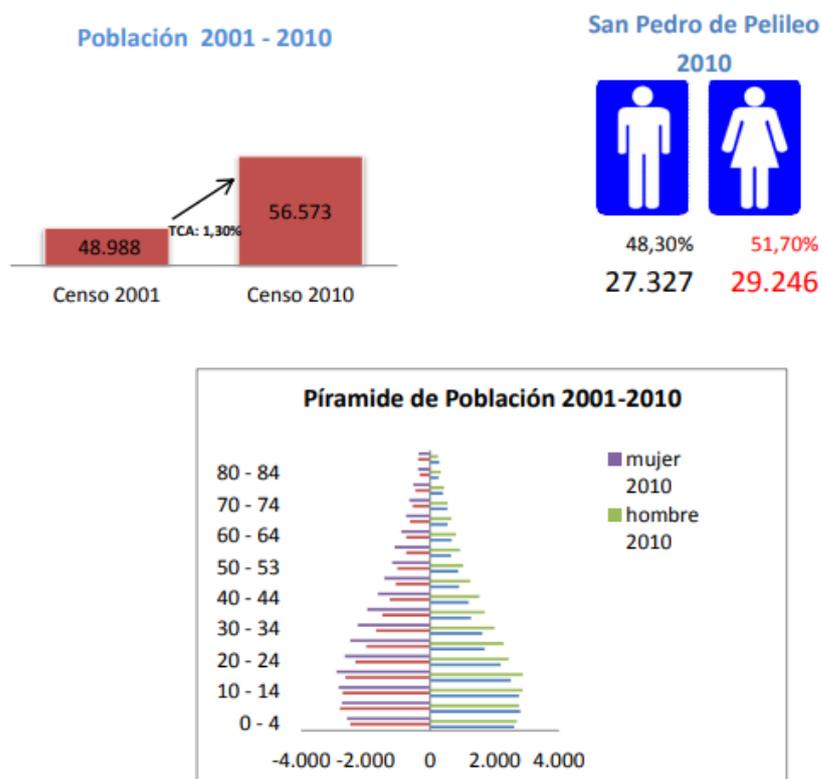


Figura 1.1 Población del área urbana y rural del cantón San Pedro de Pelileo según los censos 2001 y 2010 (Fuente INEC 2010)

1.6.3. Aspectos económicos

Pelileo es también conocida como la ‘Ciudad azul’, ya que en este cantón se produce a nivel nacional, la mayor cantidad de jeans. En la actualidad existen alrededor de 500 familias que se dedican a este oficio, las cuales fabrican un aproximado de 800 mil prendas mensuales, con una extensa variedad de diseños y

colores. El nivel de riesgo por amenazas naturales (ie., actividad volcánica o sismos) se incrementa por la alta tasa de turistas que visitan estos sectores comerciales.

En la parroquia de Salasaca una gran parte de los habitantes se dedican a la elaboración de artesanías tejidas a mano, empleando cabuya, lana de borrego, alpaca y tejidos acrílicos; estos productos se los comercializa en la Plaza Central. Los habitantes de Huambaló se dedican a la fabricación de muebles desde 1940, estos son elaborados con madera fina y en sus talleres artesanales se puede encontrar juegos de dormitorios, bares, peinadoras, juegos de sala y comedor, esta parroquia está localizada a 10 minutos del centro de la ciudad.

Pelileo es un destino turístico, cultural y productivo, se encuentra ubicado en los Andes del Ecuador, en la ruta de los volcanes, y en la puerta de entrada a la Amazonía. Uno de los lugares atractivos que tiene la ‘Ciudad azul’ es el Complejo Turístico La Moya, ya que ofrece espacios para el descanso y diversión familiar al aire libre. El mercado República de Argentina fue diseñado con una moderna infraestructura, puesto que posee un patio de comidas, parqueadero cubierto con capacidad de 90 vehículos, una plaza Cívica para eventos, salón de uso múltiple, y además aquí se puede disfrutar uno de los mejores hornados del país.

De acuerdo a los datos el sector primario engloba la mayor parte de la PEA (Población Económicamente Activa), seguido del sector terciario y secundario. Con estos antecedentes, cabe recalcar que los tres sectores de la economía se han desarrollado en los últimos años con la confección de textiles y la fabricación de muebles en Pelileo y Huambaló respectivamente. El desarrollo de la agricultura en cuanto a la PEA no es significativo como en los cantones vecinos de Patate y Píllaro, además de que el minifundio en este sector es alto, de acuerdo a las observaciones realizadas en el campo. En la tabla 1.2 y figura 1.2, indica la distribución por sectores económicos según SNI (Sistema Nacional de Información).

Tabla 1.2
PEA por sectores económicos

Sector económico	PEA
Primario	11163
Secundario	6951
Terciario	9506

Fuente: SIN (Sistema Nacional de Información)

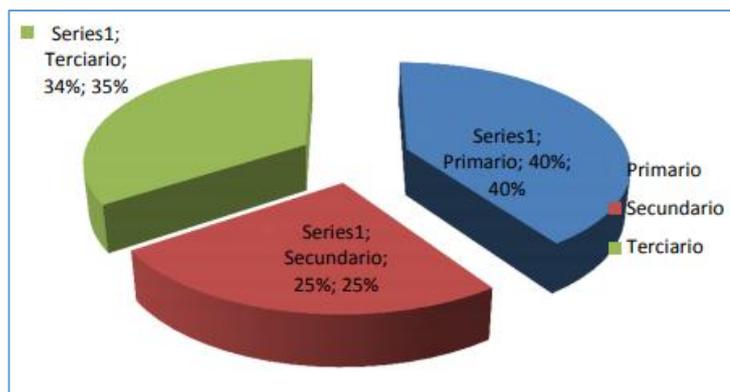


Figura 1.2 PEA por sectores económicos (Fuente SNI)

El gráfico se puede observar que los sectores productivos son primarios en un 40%, secundarios en un 25%, y terciarios en un 35% casi son homogéneos.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO, GEOLOGÍA DE VOLCANES Y SISMOTECTÓNICA

2. Descripción del área de estudio

El proyecto se encuentra ubicado en la ciudad de Pelileo, Cantón Pelileo, Provincia de Tungurahua, al sureste de la ciudad de Ambato figura 2.1. Las perforaciones geotécnicas que se utilizaron para el desarrollo de esta tesis, se realizaron en la zona urbana de Pelileo, como referencia en el parque central, sector de Pelileo Nuevo figura 2.2, y cerca al Mercado Mayorista, sector conocido como Pelileo Viejo figura 2.3.

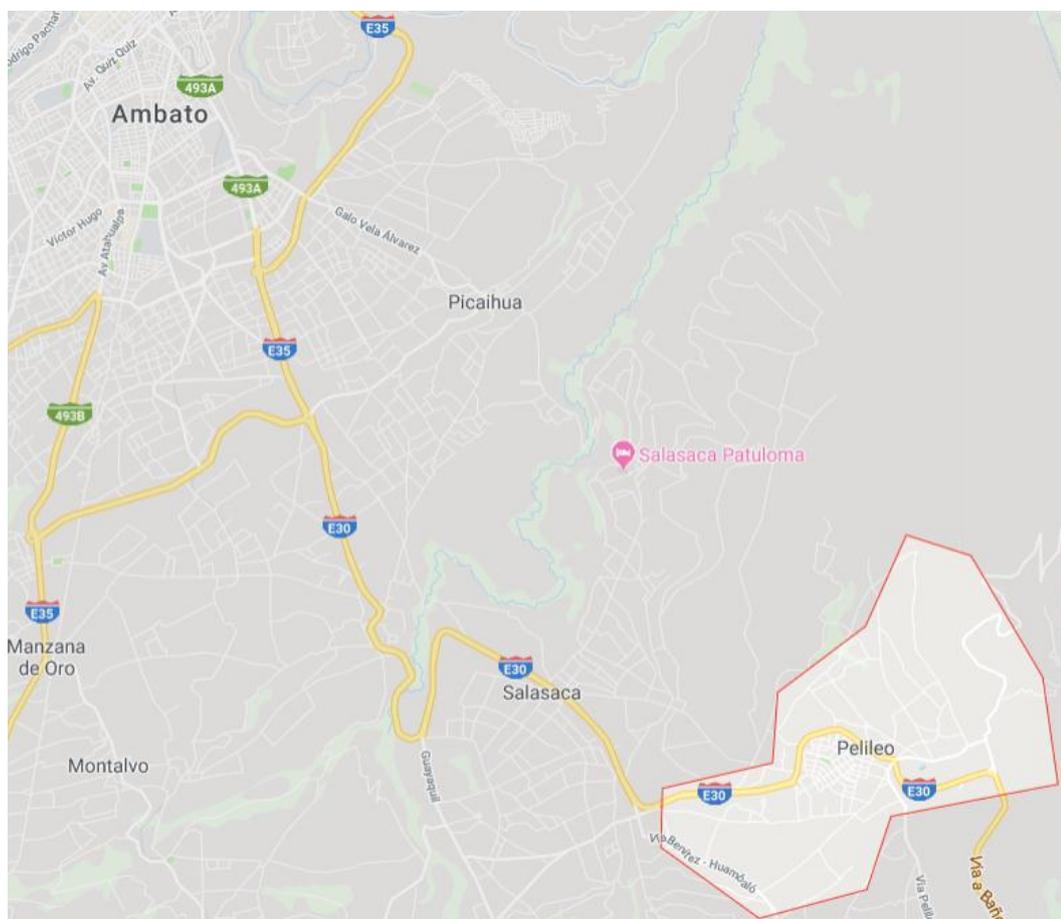


Figura 2.1 Ubicación del área de estudio de la ciudad de Pelileo y su proximidad a la ciudad de Ambato.

La figura 2.2 y 2.3, muestra los puntos donde se realizaron los ensayos. Estas imágenes fueron tomadas de Google Earth.

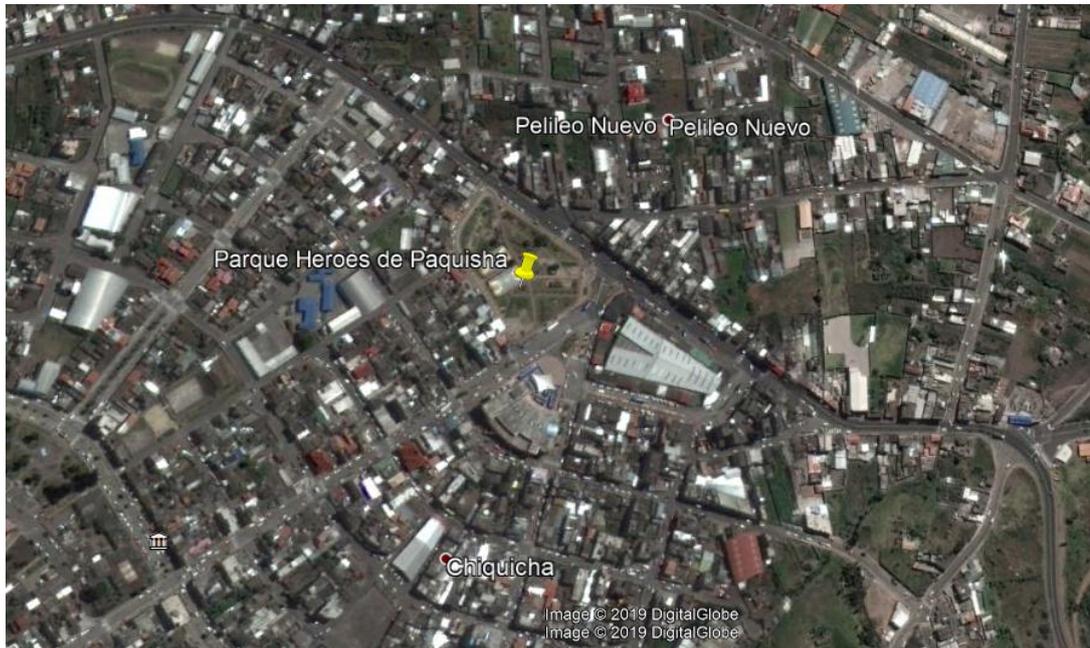


Figura 2.2 P01 Parque Héroes de Paquishá

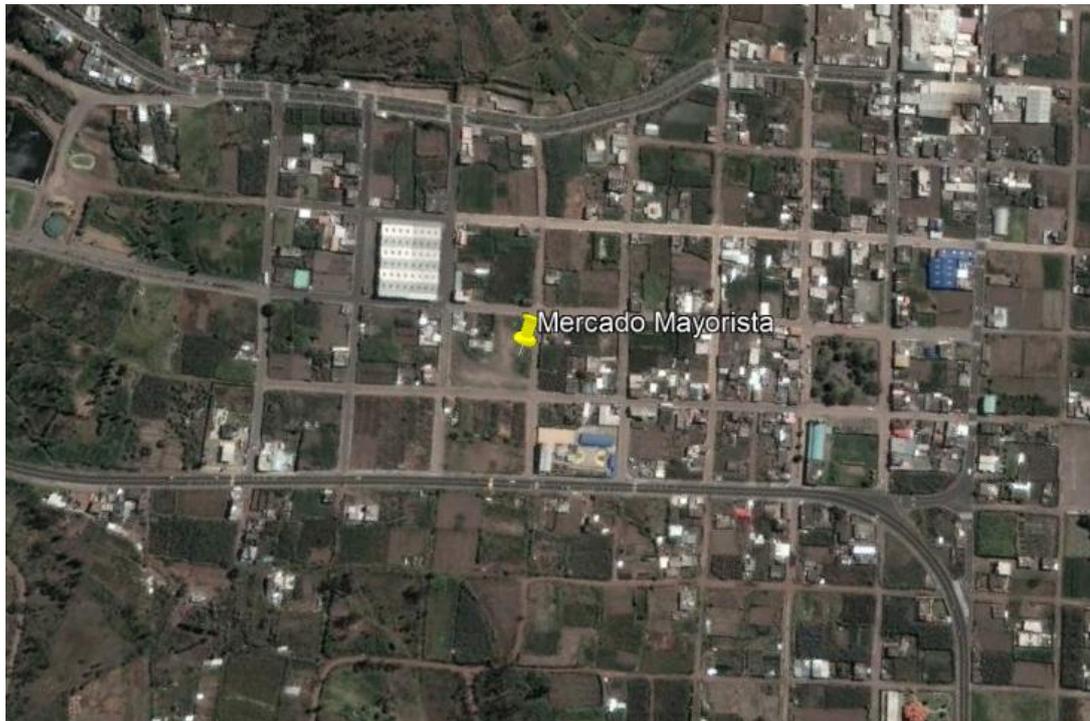


Figura 2.3 P02 Mercado mayorista o Pelileo viejo

Las perforaciones han sido ubicadas en cada sector urbano; antiguo y moderno, con la distancia entre estaciones P01 Y P02, de 1.34 km. Figura 2.4. Imagen tomada de Google Earth.

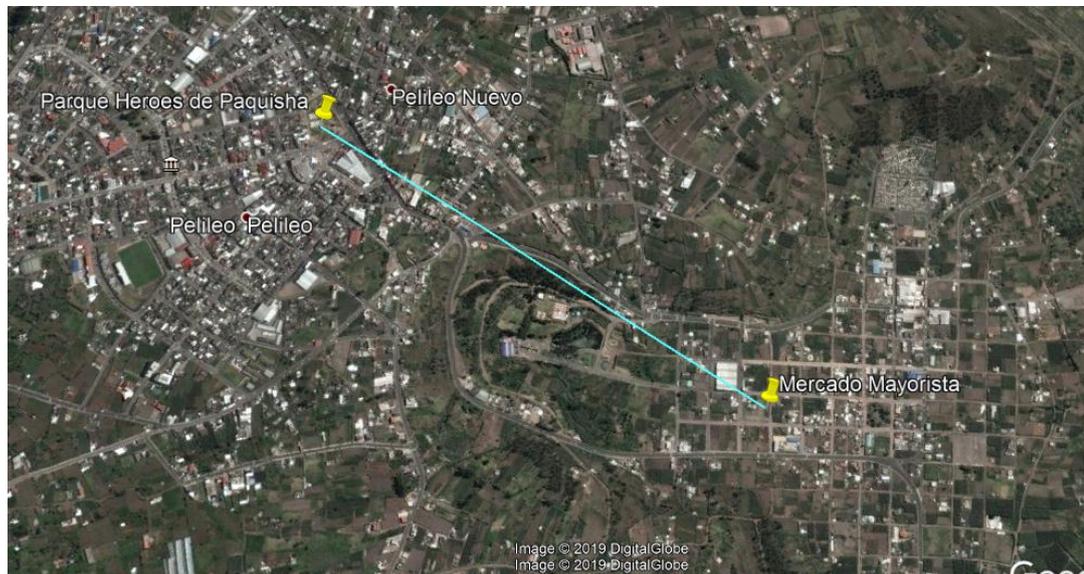


Figura 2.4 Distancia aproximada entre perforaciones (P01 Y P02) estudiadas

2.1. Caracterización geotécnica

Para este propósito, se han utilizado una perforadora ACKER ACE montada sobre patines. En las perforaciones se ejecutaron ensayos de penetración estándar (SPT) cada metro, de acuerdo con la norma ASTM D-1586.

Del sondeo se recuperaron muestras alteradas en cada metro de perforación, usando para este propósito un muestreado tipo cuchara partida y se registraron los valores del “N” del SPT, para los últimos 45 cm de penetración de la cuchara, donde las condiciones del suelo lo permitieron; en las profundidades donde esto no fue posible, se utilizó un barril NQ para obtener las muestras alteradas y avanzar con la perforación.

Las muestras obtenidas en los sondeos fueron identificadas IN SITU por el ingeniero jefe de campo, usando el método de clasificación manual visual según la norma ASTM D2488-00, para luego ser transportadas al laboratorio. En la Tabla 2.1 y 2.2 se encuentra el detalle de las perforaciones ejecutadas.

Tabla 2.1
Detalles de profundidad y revestimiento

SONDEO	PROF. (m)	REVESTIMIENTO (m)	UBICACIÓN
P-01	30	21	Parque Central Pelileo Nuevo
P-02	30	12	Mercado Mayorista Pelileo Viejo
TOTAL	60	33	

Tabla 2.2
Detalles de coordenadas y fecha

COORDENADAS		FECHA	
NORTE	ESTE	INICIO	FIN
9'583,074,00	773500	12/1/2018	14/1/2018
9'852,774,00	774838	15/1/2018	17/1/2018

Se tiene en cuenta que en las perforaciones realizadas a 30 metros no se encontró presencia de nivel freático. Se incluye un registro fotográfico descritos como figura 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, donde se puede observar la ubicación de cada uno de los sondeos.

2.2. Geología del cantón Pelileo

Información geológica del cantón Pelileo, se encuentra en la hoja geológica de Ambato a escala 1: 100.000, donde se describe la estratigrafía de rocas antiguas, secuencias volcánicas y sedimentarias marinas de edad cretácica – paleocénica; formaciones de aportes continentales como lavas y piroclásticos son de edad pliocénicas y pleistocénicas. Suelos sueltos blandos y pocos consistentes de edad más reciente del holoceno, corresponden a depósitos coluviales, lahares volcánicos y aluviales acumulados desde los principales ríos. Rocas ígneas intrusivas afloran en el terreno solamente en el sector occidental de la hoja geológica. El área de estudio se localiza en el cuadrante derecho inferior de la hoja geológica de Ambato. Los rasgos geomorfológicos y sus litologías, difieren en su consistencia y edad, Hay que señalar el comportamiento de los más recientes depósitos que permiten una mayor amplificación de las ondas sísmicas y por ende daños en las infraestructuras. A

continuación, se incluyen la descripción de cada una de las formaciones geológicas de la región y del cantón Pelileo.

2.2.1. Volcánicos de Huisla Mumul, Igualata, Chiquicha y Sagoatoa (Plioceno)

El volcán Sagoatoa ubicado al Noroeste de Ambato, ocupa una gran superficie en la parte occidental del Valle Interandino y tiene un drenaje radial, está constituido de lavas y aglomerados de composición y augita, feldespatos zonados, laminillas de oligoclasa asentadas en una matriz vítrea acompañada de feldespato y magnetita. En el flanco oriental del Sagoatoa, junto a la carretera Panamericana, afloran conglomerados andesíticos del Unamuncho; que se trata de un pequeño cono parásito del Sagoatoa. En cerro Chiquicha que se localiza en el centro del Valle Interandino, está cubierto de tobas volcánicas recientes. Los afloramientos son muy limitados y los forman andesitas piroxénicas. En la esquina Sureste de la hoja se encuentran piroclásticos del cerro Huisla (referida a la hoja geológica de Chimborazo), en que se presenta también los volcanes pliocénicos de Igualata y Mumul.

2.2.2. Lavas del Carahuairazo y Piroclastos del Chimborazo (Pleistoceno).

Estas rocas volcánicas compuestas de andesitas piroxénicas porfiríticas y tobas pomáceas con fragmentos andesíticos, forman pequeños afloramientos a lo largo del margen meridional de la hoja geológica de Ambato, pero son más notorias en el terreno expresado en la hoja geológica de Chimborazo.

2.2.3. Formación Latacunga (Pleistoceno)

La formación geológica Latacunga presenta una gran variedad de depósitos, regionalmente los sedimentos fluvio-lacustres se encuentran bien expuestos alrededor de la laguna de Yambo, y en el flanco izquierdo del Río Cutuchi cerca de Guapante; están constituidos de una secuencia parcialmente consolidada de arenas, limos, tobas y conglomerados dispuestos irregularmente con estratificación cruzada de extensión lateral muy limitada. Cubriendo a los sedimentos fluvio-lacustres, se hallan enormes depósitos diseminados de piedra pómez de color blanco, especialmente en los alrededores de Latacunga y Salcedo, estos depósitos son asociados a erupciones volcánicas del volcán Cotopaxi.

2.2.4. Formación Cangagua (Cuaternario)

Por encima de la formación geológica Latacunga se destaca una capa de cenizas volcánicas, con una potencia que fluctúa entre 10 y 30 m de espesor. Dentro de la

Cangagua, al Oeste de Salcedo, se localizan fragmentos esféricos de 5 a 8 cm. de diámetro, diseminadas en un horizonte de uno a dos metros de potencia. Según, Walter Sauer (1965), estas esfericidadades fueron obra de un escarabajo pelotero, *Coprinisphaera ecuadoriensis*, de la familia Scarabacidae, el mismo que tiene importancia como fósil guía del Pleistoceno.

2.2.5. Depósitos superficiales (Holoceno)

Las dinámicas de los ríos han formado depósitos aluviales y varios pisos de terrazas, en estas últimas son la mayoría de los cultivos aprovechados. Las ciudades de Ambato y Pelileo, están asentadas en terrazas antiguas. Desprendimientos de taludes de suelos inestables son evidentes al largo del río Patate entre los poblados de Pelileo Viejo y Patate, estos suelos son conformados por material de lahares volcánicos y detritos de avalanchas (referido también como, debris avalanche). Por último, existe una cubierta débil discontinua de ceniza eólica que cubre gran parte de la zona de Pelileo.

2.3. Sismotectónica y sismos corticales

La integración de datos geológicos, geomorfológicos y geofísicos permiten una mejor clasificación de perfiles de suelos geotécnicos susceptibles a deformaciones cosísmicas, en particular en las áreas sísmicas con niveles de magnitudes moderados a altos ($6 \leq M_w \leq 7.3$); donde las vulnerables áreas urbanas han tenido un rápido crecimiento poblacional no planificado. La poca planificación en los catastros municipales delineando las normativas de grupos de infraestructuras, y la no consideración de los tipos de suelos geotécnicos propensos a efectos geológicos cosísmicos (referido en literatura inglesa como: Earthquake Environmental Effects, ejemplos, licuefacción de suelos granulares y deformación cíclica de suelos finos cohesivos), incrementan el nivel de riesgo por terremotos en ciudades de la sierra andina de Ecuador. En recientes años, varias iniciativas gubernamentales han desarrollado normativas de construcciones como las NEC-2002, NEC-2010 y NEC-2015 (Normas Ecuatorianas de la Construcción). Con el reciente gran terremoto de Pedernales del 16 de abril 2016 ($M_w 7.8$), la NEC de seguro será modificada agregando nuevos parámetros de caracterización y periodos de suelo.

No obstante, aquellas construcciones antiguas de adobe, son las más numerosas y vulnerables en los principales poblados rurales de la zona interandina, un ejemplo es

el cantón Pelileo, donde el conjunto de poblaciones rurales es mayor que la cabecera cantonal de Pelileo (ver Tabla 1.1). La interacción suelo-estructura tiene un rol importante en los análisis de la amenaza sísmica (volcanes y terremotos), en este estudio se direcciona a identificar los tipos de suelos geotécnicos de ambiente deposicional cuaternario y su relación con los efectos geológicos cosísmicos (Earthquake Environmental Effects, EEE).

Los EEE (Earthquake Environmental Effects) son las expresiones de peligros geológicos cosísmicos más comunes en los suelos geotécnicos de mala calidad, de ambientes sedimentarios de deposición reciente (ie., Holoceno). La grandeza de estos rasgos cosísmicos son comparables con la deformación cíclica de sedimentos finos y licuefacción de sedimentos granulares, de los tipos de suelos geotécnicos D, E y F (NEC-15). Durante moderados y fuertes terremotos, estos EEE pueden ser representados en cartografía por las isosistas de máximas intensidades macrosísmicas (Chunga et al., 2018; Michetti et al., 2007).

La propuesta de este trabajo de tesis, es contribuir en los planes de desarrollos urbanos usando parámetros geotécnicos en ambiente de suelos volcánicos. Un análisis multicriterio es usado para establecer unidades litológicas propensas a deformación cosísmicas con los siguientes objetivos: (1) investigación de fallas geológicas corticales con afectación local considerando un radio de 20 km, los sismos lejanos de tipo de subducción interplaca no tienen efecto de daños considerable para la ciudad de Pelileo, no hay reportes en la historia sísmica del cantón Pelileo; (2) estratigrafía sedimentaria y volcánica y su correlación con perforaciones geotécnicas y ensayos geofísicos Vs30 y periodos de suelos, y (3) delineación de tipos de suelos geotécnicos combinados con mapas geomorfológicos que incluya aspectos fundamentales para diseños de construcción en el área urbana de Pelileo.

2.3.1. Sismicidad histórica asociada a fallas geológicas corticales

Sismos lejanos de tipo de subducción interplaca no son considerados en este estudio por su poca probabilidad de formar efectos geológicos cosísmicos. Para el área de estudio, la historia sísmica desde 1645 hasta 1949 es asociada a la activación de fallas geológicas corticales (o superficiales) figura 4.1, los cuales tienen un efecto de daño local en las proximidades de sectores urbanos y rurales. Sismos volcano-tectónicos de magnitudes menores a 4.5 son reportados en estructuras volcánicas

activas, el más próximo a Pelileo, es el volcán Tungurahua. El cantón San Pedro de Pelileo se ha visto afectado, muy fuertemente, por sismos de diversas intensidades macrosísmicas, tales grados de medición han dependido de los tipos de construcciones vulnerables como los de tipo adobe, que en esos tiempos eran muy comunes en estas áreas andinas. En la siguiente reseña histórica, se detalla la fecha, localidad del epicentro y máximas intensidades alcanzadas (véase en la tabla 2.3).

Tabla 2.3

Terremotos en la región Interandina central del Ecuador intensidades > VIII

No.	Fecha			Epicentro		Int.	Zona de mayor afectación
	Año	Mes	Día	Lat.	Lon.	Máxima MM	
1	1645	3	15	1,68	-78,55	IX	Chimborazo, Tungurahua
2	1687	11	22	-1,1	-78,25	VIII	Tungurahua
3	1698	6	20	1,45	78,3	X	Tungurahua, Chimborazo
4	1757	2	22	0,93	78,61	IX	Cotopaxi, Tungurahua
5	1797	2	4	-1,43	-78,55	XI	Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi, Bolívar
6	1949	8	5	1,25	78,37	X	Tungurahua, Chimborazo, Cotopaxi

Fuente: Instituto Geofísico de la escuela politécnica nacional

2.3.1.1. Sismo del 20 de junio de 1698 (Intensidad epicentral X)

Los daños materiales se extendieron desde el Nudo de Tiopullo hasta el Nudo del Azuay. Muertos: Ambato y poblaciones cercanas más de 3000 personas. Latacunga aproximadamente 2000, en los pueblos de sus jurisdicciones se estimó unas 1500 víctimas; en Patate alrededor de 200 y en Riobamba 100. En vista de la gran destrucción y efectos asociados, se intenta mudar de sitio a las ciudades de Ambato, Latacunga y Riobamba, lo cual no fue permitido por las autoridades de la Real Audiencia.

2.3.1.2. Sismo del 22 de febrero de 1757 (Intensidad epicentral IX)

Gran terremoto de Latacunga y su jurisdicción, Destrucción de iglesias y casas en la ciudad y en los pueblos vecinos. Murieron más de 4000 personas. Efectos considerables en Tungurahua. Réplicas continuas de variadas intensidades durante los siguientes días.

2.3.1.3. Sismo del 4 de febrero de 1797 (Intensidad epicentral XI)

Destrucción total de la Villa de Riobamba. El terremoto más destructivo en el territorio ecuatoriano y uno de los de mayor magnitud en toda su historia. Destrucción

total de la antigua ciudad de Riobamba, razón por la cual no fue reconstruida en el mismo sitio y se mudó al lugar que actualmente ocupa. Daños muy severos en ciudades, pueblos y caseríos de lo que actualmente son las provincias de Chimborazo, Tungurahua y Cotopaxi y parte de Bolívar y Pichincha. Las trepidaciones y ondulaciones del suelo duraron aproximadamente 4 minutos. Inmensos deslizamientos de laderas y montes, uno de los cuales, sepultó por completo tres barrios de Riobamba.

2.3.1.4. Sismo del 5 de agosto de 1949 (Intensidad epicentral X)

Gran terremoto de Pelileo, ciudad que fue totalmente destruida. Destrucción casi total de muchas poblaciones de las provincias de Tungurahua y Cotopaxi. Graves daños en localidades de las provincias de Chimborazo y Bolívar. Grandes grietas en el terreno y derrumbes y deslizamientos voluminosos en montes y caminos de toda la región. Este terremoto de fuente sísmica de falla geológica cortical, tuvo un alto potencial destructivo debido a la generación de grandes deslizamientos por efectos de sitio en la localidad de Pelileo. El terremoto ocurrió a las 14h08 (tiempo local) y su epicentro, de acuerdo a las últimas investigaciones, se ubica en una falla al sur del Nido Sísmico de Pisayambo, aproximadamente a 20 km nororiente de Pelileo. La magnitud calculada en función de las intensidades generadas es de 6.8 con una profundidad menor a 15 km.

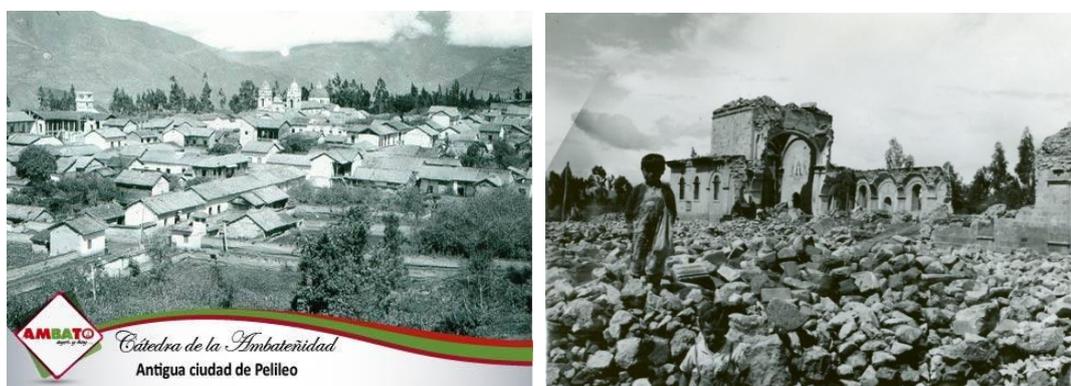


Figura 2.5 Imagen de antigua ciudad de Pelileo y ruinas de la Iglesia de Santa Rosa, provincia de Tungurahua. Fuente: USGS

De acuerdo a las investigaciones realizadas por José Egred (1968), el terremoto dejó más de 6 000 muertos, alrededor de 100.000 personas sin hogar y un área afectada de 1.920 km². Las ciudades con mayor destrucción fueron Pelileo 100%, Píllaro 90%, Guano 80% y Ambato 75%. Los efectos cosísmicos del terremoto se extendieron hasta las provincias de Tungurahua, Cotopaxi, parte de Bolívar, Pichincha y Pastaza, además el sismo se sintió prácticamente en todo el país.

En la figura 2.6 se muestra el mapa de intensidades en el terremoto de pelileo ocurrido el 05 de agosto de 1949, de acuerdo a lo especificado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

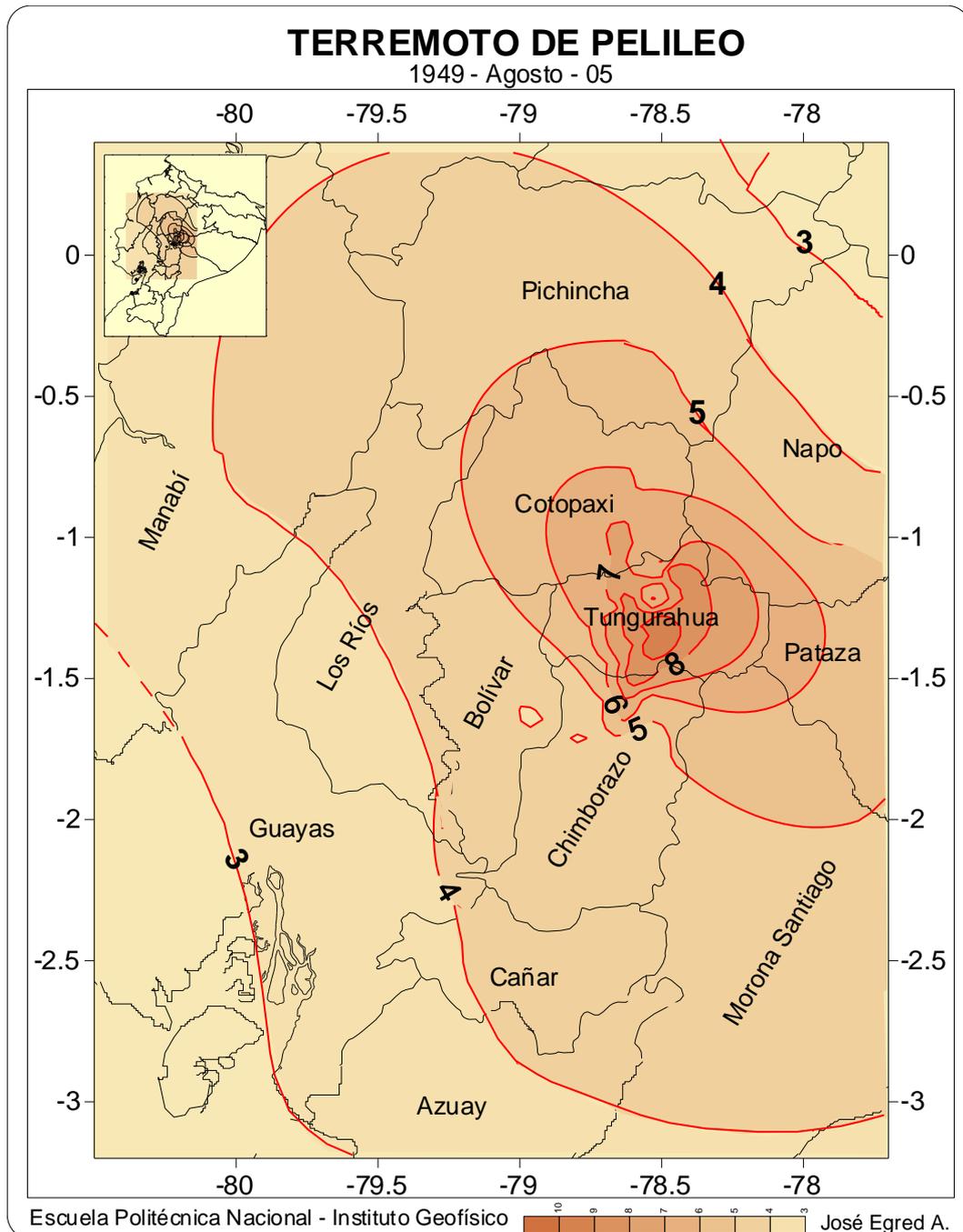


Figura 2.6 Isosistas del sismo del 5 de agosto de 1949 (Imagen proporcionada por José Egred al Director de esta tesis de grado, para estudios académicos)

En las varias investigaciones realizadas por Egred (1968), se pudo determinar que entre los principales efectos geológicos cosísmicos, hubieron: grietas métricas en el terreno y derrumbes, así como grandes deslizamientos en montes y caminos de toda

la región, cambio del paisaje en muchos lugares, licuefacciones (especialmente en el sector de La Moya de la ciudad de Pelileo), donde tradicionalmente ha ocurrido el mismo fenómeno cosísmico, con otros terremotos. Además, brotaron nuevas fuentes termales y algunas modificaron sus caudales y temperatura, mientras otras desaparecieron temporal o definitivamente.

La destrucción de Pelileo fue tal que la ciudad se debió reconstruirse en otro sitio, aunque con posterioridad se repobló el lugar afectado que en la actualidad lleva el nombre de Pelileo Viejo. El terremoto de 1949 fue uno de los fenómenos naturales más desastrosos del pasado siglo en el Ecuador; las pérdidas materiales tanto para el Estado como para la población fueron incalculables y las consecuencias socioeconómicas afectaron al país durante varios años. En la figura 2.6, se detalla las curvas isosistas de intensidades elaboradas por Egred, 1968.

2.4. Peligros volcánicos en el cantón Pelileo

2.4.1. Peligros volcánicos y tipos de unidades volcánicas en el terreno

Los volcanes son considerados activos si sus últimas actividades están en el rango de los 10.000 años (Hall et al., 2008). Las erupciones en Ecuador mostraron alta variabilidad de estilos eruptivos (efusivos hasta explosivos) y de magnitudes (VEI- índice de explosividad volcánica, entre grados 0 y 6). Este índice tiene en cuenta parámetros como volumen de cenizas expulsadas por el volcán, altura de la columna, frecuencia de la erupción y su extensión de depósitos en el terreno (Newhall y Self; 1982).

Amenazas volcánicas (estructura del mismo volcán) y sus peligros volcánicos (caída de cenizas, deslizamientos de lahares, flujos piroclásticos, debris avalanche), pueden presentarse antes, durante y después de las erupciones, que pueden afectar las poblaciones cercanas al volcán. Antes de una erupción pueden presentarse secuencias de sismos de baja intensidad, debido al proceso de subida del magma a la superficie, aquí son pocos evidenciados deslizamientos de taludes inestables. Fracturación del substrato, fricción del magma a lo largo del conducto y reactivación de fallas superficiales por deformaciones del edificio volcánico pueden generar sismos de diferentes magnitudes.

Los lahares son eventos de movilización de material volcánico no litificado y posicionado en las laderas, que pueden generar flujos de agua con alta concentración de sedimentos finos y gruesos (Smith and Fritz, 1989). Los depósitos de lahares son

un “continuum” entre “dilute streamflow” (>20% de sedimentos en el flujo) hasta avalancha de escombros (debris avalanche). Las diferentes litofacies que se pueden observar en el depósito testimonian variaciones en la relación sedimento/agua, turbulencias y fuerza dispersiva entre los granos. Los lahares se pueden generar en laderas de volcanes inactivos, impulsados por eventos de lluvias intensas, por deshielos de glaciares, por fusión de nieve o por salida de agua desde lagunas presentes en el cráter (Smith y Love, 1991). En literatura son bien distinguidos en primarios (se forman durante la actividad eruptiva) y secundarios (se generan en periodos de pausas eruptivas o luego de largo tiempo). Los lahares causan erosión al socavar las pendientes en los tramos donde el substrato rocoso es blando.

Las avalanchas de escombros volcánicos se originan por deslizamientos en los flancos de un volcán (Pierson y Scott, 1998). Los flujos que se generan tienen alta movilidad porque es relacionada a fuerzas gravitacionales. Estos flujos viajan a altas velocidades (> 100 km/h), alcanzando grandes distancias desde su fuente y tal vez logrando sobrepasar barreras topográficas (Siebert, 1984; Ui et al., 2000).

Los grandes deslizamientos en los edificios de los volcanes se pueden reconocer por un escarpe de deslizamiento en forma de herradura o anfiteatro que dan al edificio la apariencia de un cono truncado, y por la presencia de un depósito de avalancha de escombros al pie del volcán, que a menudo exhibe una morfología tipo hummocks (Clavero y otros., 2002).

Los depósitos de avalancha de escombros son constituidos por bloques y líticas volcánicas métricas subangulares; generalmente mal clasificado con matriz fina en proporción variables, dependiendo de la distancia respecto al punto de donde se generó el flujo. Estas tipologías de amenazas volcánicas se pueden generar por actividad sísmica cercana, efectos de intrusión magmática que genera deformación del edificio volcánico, alteración hidrotermal que altera la calidad del macizo rocoso o efectos climáticos como intensas lluvias.

Por la cercanía de Pelileo al volcán Tungurahua, se registra caída de cenizas en el área poblada del cantón y la ocurrencia de deslizamientos de tierras, caída de techos de las viviendas y posible afectación de grietas del suelo con la posible afectación de edificios y pérdida de vidas humanas.

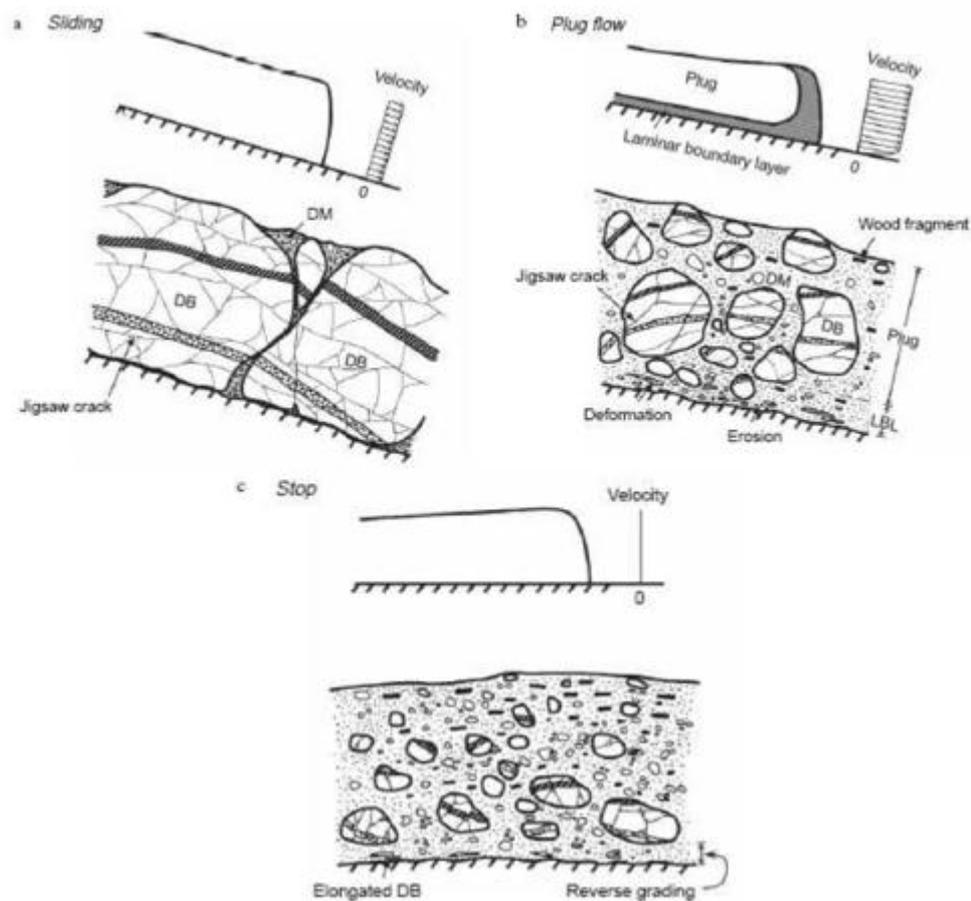


Figura 2.7 Diseños esquemáticos de secciones proximales, mediana y distales de avalanchas de escombros y detritos (Takarada y otros, 1999 mod.)

2.4.2. Historia volcánica y afectación en los suelos de Pelileo

2.4.2.1. Actividad del volcán Tungurahua

El volcán Tungurahua está ubicado en el sureste de la ciudad de Pelileo, tiene una altura de 5.023 m.s.n.m. Su historia eruptiva, de acuerdo con Hall et al. (1999) consiste en tres periodos principales: Tungurahua-I (33000 a 14000 aAP), Tungurahua –II (14000 a 3000 aAP) y Tungurahua-III (2300 aAP – actualidad. Durante su evolución geológica, el Tungurahua ha sufrido por lo menos dos colapsos sectoriales, uno a ~30000 AP (Le Pennec et al., 2006; Bustillos, 2008) y otro a ~3000a AP (Hall et al., 1999; Bustillos, 2008), los cuales originaron avalanchas de escombros y cuyos depósitos han rellenado en parte los valles de los ríos Patate y Chambo.

En la historia eruptiva de Tungurahua están registrados también dos eventos de avalancha de escombros (30 Ka AP y 3 Ka AP; KA significa por mil) y uno de esto se encuentra distribuido hacia el Noroccidente del volcán (sitios Cardonpamba y Cotaló).

Magma composition	Sequence name / deposits	Eruptive stages, major eruptions and datings
Andesitic	1916-1918 eruption	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Mainly pyroclastic activity</div>
Dacitic --> acid andesite --> andesitic	1886 eruption	
Dacitic --> acid andesite	1773 eruption ← P2	
	Unknown activity ←	
Dacitic	La Rea and Las Juntas upper pyroclastic flows	
Basic andesite & andesitic	Bomb-rich pyroclastic flows in La Rea and upper Las Juntas sections (layer F)	890 +/- 135 BP (ash dep.)
dacitic --> acid andesite	Las Juntas pyroclastic flow sequence (middle part of the section) ← P1	955 +/- 80 y. BP
		1230 +/- 30 y. BP
		1470 +/- 85 y. BP in an ashfall deposit
Andesitic	Juive Chico and Vazcun Lava flows	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Construction stage</div>
Basic andesite & andesitic	lower Las Juntas pyroclastic flows, La Piramide and Motilonos pyr. flows, and lower, mainly andesitic, fallout deposits	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Pyroclastic activity</div>
Basic andesite	Lower Las Juntas series + Rio Chambo (mainly lava flows)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Construction stage</div>
		2215 +/- 90 y. BP
Dacitic	Cusua dacites	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Main avalanche event</div>
		~2955 +/- 90 y. BP
Mainly acid andesite	Tungurahua II	
Basic andesite to dacitic	Tungurahua I	Age : up to ~ 0.7 Ma

Figura 2.8 Principales eventos volcánicos eruptivos de Tungurahua (Hall y otros, 1999)

Los peligros volcánicos relacionados al volcán Tungurahua, y que pueden modificar el terreno de la ciudad de Pelileo son: avalanchas de escombros por deslizamiento de grandes porciones de los sectores oeste del volcán y durante la erupción con caída de ceniza cuando el viento tiene dirección Oeste-Noroeste.

Por las avalanchas de escombros estudios previos (Hall y otros, 1999) indican que la ciudad de Pelileo puede ser afectada por avalanchas de escombros, estas tipologías de avalanchas de escombros, son avalanchas de bajo espesor y alta distribución caracterizada por presencia de matriz arenosa, que puede favorecer la movilidad del flujo a través de la pendiente del volcán.

En la figura 2.9, se incluye el mapa de zonificación de avalanchas y lahares, del volcán Huisla y Tungurahua que afecto a la zona de Pelileo, con posibles afectaciones a futuro.

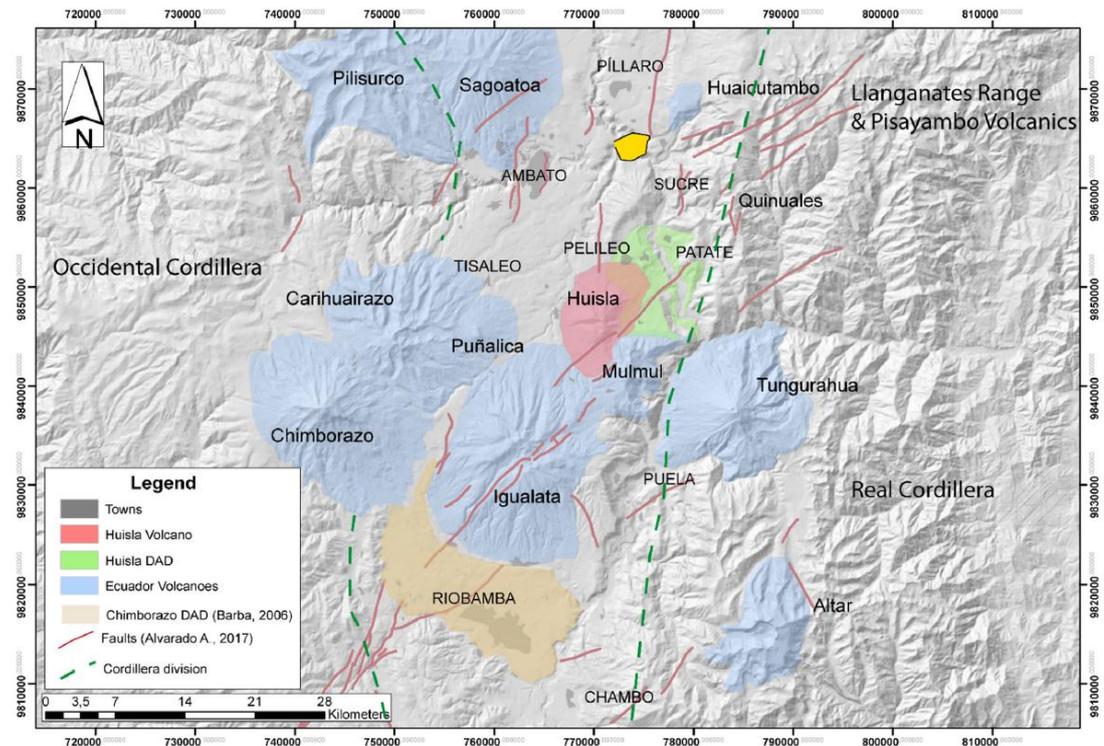


Figura 2.9 Depósitos de avalanchas y lahares desde el volcán Huisla para el poblado de Pelileo. Fuente: Espín-Bedón et al., 2018. Los suelos de Pelileo tienen procedencia de materiales transportados desde los volcanes Huisla y Tungurahua.

2.4.2.2. Actividad del volcán Huisla- Mulmul

El volcán Huisla está ubicado a 6.5 km suroccidente de Pelileo y está constituido por tres picos principales: Huisla, Limpe y Padreloma. Todos los tres picos tienen una altura cercana de los 3600-3700 m.s.n.m. El volcán Huisla tiene evidencia de un pasado de múltiples deslizamientos en el sector occidental, cuyos flancos tienen pendientes de 15°- 25°.

Este volcán está constituido por alternancia de lavas y de capas de cenizas de composición andesíticas ricas en anfíboles y por andesitas ricas en piroxeno y olivino (Stubel, 2004), con afinidad calco-alcalina (Espín-Bedón, 2018).

El volcán Huisla generó avalanchas de escombros que cubre una superficie de 65 km² por un volumen aproximado de 3.3 km³. La datación de este evento resulta difícil pero las relaciones estratigráficas entre la ignimbrita Chalupas (200 ka – Beate 2006) y depósitos de caídas de Tungurahua (9-10 Ka – Bustillos 2008), permite ubicarlo temporalmente en este intervalo de tiempo. La abreviación Ka representa los 1.000 años.

En su historia eruptiva, el volcán Huisla mostró 4 grandes erupciones plinianas que según Ordoñez (2012), menciona como TP1, TP2, TP3 y TP4. El primero evento (TP1) fue un evento anterior a 39 ka y de VEI=5 que generó un depósito de caída de lapillos de composición riolíticas, que cubrió parcialmente Pelileo con un espesor de más o menos 1 metro. El depósito TP-1 está constituido por fragmentos juveniles de pómez pumita blanca (80-85% vol.) micro-vesiculada, bajo porcentaje de cristalinidad y fibrosa. La pómez tiene formas tabulares y sub-esféricas, con bordes angulosos a sub redondeados.

El segundo evento, más joven de 39ka, es un evento más local con índice VEI presumiblemente menor de 4. La pómez de la capa TP2 tiene una vesicularidad entre moderada a baja y su paragénesis mineral consiste en biotita negra y dorada, plagioclasa, anfíbol y trazas de magnetita y piroxeno. Los fragmentos líticos hidrotermalizados, de colores rojizos y anaranjados, no están ampliamente dispersos en el depósito, sino que se concentran especialmente en la base y al tope, proporcionando cierta estratificación en el depósito.

Otra capa guía importante es la denominada TP-3, la cual está ampliamente distribuida en la región de Ambato y solo débilmente en Pelileo. Regionalmente, el depósito es homogéneo, aunque muestra una delgada capa basal de pocos centímetros de espesor, que está compuesta por cenizas de pómez blanca y cristales libres con buena clasificación que representan el inicio explosivo de la erupción. Estas cenizas basales cambian transicionalmente a lapilli de pómez que exhiben una gradación inversa-normal, conformada casi exclusivamente por fragmentos de pómez blanca (~99 % vol.). El contenido de líticos, tanto accesorios como accidentales, es casi nulo (<1% vol.) aunque aumenta un poco su proporción en dirección del centro de emisión. Hacia el tope del depósito el tamaño de los piroclastos varía nuevamente, de manera gradual, a cenizas.

Los últimos eventos eruptivos del volcán Huisla (TP4 por Ordoñez, 2012) son cuatro eventos separados por pequeños Intervalos de tiempos, porque en el terreno no se presentan evidencias de paleosuelos. El depósito es masivo constituido por ceniza y lapillos finos desde blanquecida a color beige. La pómez es débilmente vesiculada y en las últimas fases parecen más fibrosos. La mineralogía de la pómez consiste en plagioclasas, anfíbol, piroxeno, biotita y magnetita. Los líticos son fragmentos de andesitas de grises a rojizas-anaranjadas.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA Y FASES DE INVESTIGACIÓN

3. Fases de Investigación

La metodología de investigación comprende cuatro fases: (1) caracterización de fallas geológicas y geología de volcanes, (2) prospección geotécnica y sísmica Vs30, (3) peligrosidad sísmica y respuesta de sitio, y (4) Licuefacción de suelos de Pelileo.

3.1. Fase 1. Caracterización de fallas geológicas y geología de volcanes.

Se elabora un catálogo de fallas geológicas en un radio de 30 km de distancia del sitio de Pelileo. Información de fallas activas cercanas al sitio de estudio son obtenidas desde literatura, Chunga 2010, Ego et al. 1996 y 1997, Eguez et al. 2003. Esta información contiene: (1) tipo, geometría, y longitud de la falla, (2) cinemática y profundidad asociada al plano de falla, estimada desde los datos hipocentrales de sismos instrumentales, (3) forma y tendencia estructural y morfológica sobre el terreno a través del uso de modelos digitales de elevación (DEM, siglas en inglés) con resolución de 30 metros de alcance.

Estos parámetros son muy importantes para calcular la distancia horizontal desde la falla activa hacia el sitio del deslizamiento. De acuerdo a los principios geológicos estructurales establecidos por Wells & Coppersmith (1994) y Leonard (2010), el tamaño y la forma de la ruptura en el plano de falla son dependientes de la magnitud del terremoto, con eventos más grandes rompiendo porciones más largas y más anchas del plano de falla. En este análisis, todas las fallas identificadas para el proyecto de estudio se consideran “activas”.

Para la estimación de máxima magnitud que compara la longitud de la ruptura de la falla y su profundidad asociada; confirmando lo anteriormente mencionado, se estima las magnitudes máximas para cada una de las 14 fallas corticales individualizadas en este estudio de Pelileo (figura 4.1), y el máximo desplazamiento vertical basadas en relaciones empíricas de regresión de magnitud-terremoto-ruptura/desplazamiento de falla geológica, propuesta por Well & Coppersmith (1994).

$$\text{Magnitud estimada} = 5.08 + 1.16 * \text{LOG}(L)$$

$$\text{Desplazamiento de falla} = \text{EXP}(-1.38+1.02*\text{LOG}(\text{Lf}))$$

Donde Lf, es la longitud de la falla geológica capaz cartografiada en el terreno.

Leonard (2010) propone modificaciones y correcciones a la formula precedente para estimar máximas magnitudes.

$$M_w = a*\log(\text{Lf})+b; \text{ siendo los coeficientes de, } a=1.52 \text{ y } b=4.33$$

$$\text{Magnitud estimada (M)} = 1,52*\text{LOG}(\text{Lf})+4,33$$

Wesnousky (2008), propone la relación de escala de terremotos para cada tipo de fallas capaces, tales como:

$$\text{Fallas cizallas; } M_w = 5.56+0.87*\text{Log}(\text{Lf})$$

$$\text{Fallas normales; } M_w = 6.12+0.47*\text{Log}(\text{Lf})$$

$$\text{Fallas inversas; } M_w = 4.11 +1.88*\text{Log}(\text{Lf})$$

Estas ecuaciones de regresiones indican que no todos los tipos de fallas de una misma dimensión pueden generar sismos de un mismo valor de grado de magnitud (Stirling et al., 2013; Wesnousky, 2008), esta teoría es aplicada para las fallas capaces delineadas para la provincia de Tungurahua (y recomendada para posteriores estudios), donde se define que aquellas fallas de tipo inversa son consideradas potencialmente capaces de generar terremotos mayores que aquellas de igual longitud pero de tipos cizallas y normales.

La relación de la dimensión de ruptura y longitud (delineada en Kilómetros) respecto al máximo desplazamiento (delineada en metros) y máxima magnitud (M) para el área de estudio, es representado en la Tabla 4.1 (catálogo de fallas activas). Los niveles de confiabilidad para cada una de las fallas capaces han sido aplicados desde análisis sismológicos (registros de sismos instrumentales delineados a lo largo de la estructura sismogénica) y morfológicos (escarpes de fallas o relieves discontinuos observados en el modelo digital del terreno, DEM), clasificándolos en tres categorías: *I (cierto), **II (deducible), y ***III (incierto o hipotético).

Los valores de PGA en roca (Peak Ground Accelaration) han sido estimado para cada una de las fallas geológicas aplicando la fórmula propuesta por Fukushima & Tanaka (1990).

Estos valores de aceleraciones máximas en rocas son confrontables con el mapa de zonación sísmica del Ecuador, de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015). La fórmula PGA roca aplicada en este estudio es:

$$\text{PGA estimado} = \frac{(10^{(0,41*Me-\text{LOG}10(Hf+0,032*10^{(0,41*Me))}-0,0034*Hf+1,3)})}{980}$$

Donde H_f , es el hipocentro o profundidad en kilómetros de la falla geológica.

Estos valores de máximas magnitudes y PGA estimados desde el análisis de fallas geológicas activas permiten aproximarnos a comprender los niveles de sismicidad cuando los datos de sismos históricos son muy escasos y de corto intervalo en el tiempo.

En el análisis de geología de volcanes, se han obtenido información de los volcanes Huisla (nivel inactivo) y Tungurahua (nivel activo), ambos han modificado el territorio y los niveles de sedimentos volcánicos son atribuidos a erupciones volcánicas acontecidas en el cuaternario.

3.2. Fase 2. Prospección geotécnica y sísmica Vs30.

Para el presente trabajo de tesis, la información es proporcionada por un trabajo conjunto con la empresa Risk & Safety, AOC Ingeniería, y la Municipalidad de San Pedro de Pelileo, quienes seleccionaron la ubicación de las perforaciones cumpliendo con aspectos de seguridad, permiso, decisiones de autoridades y otras. En la figura 3.1 se muestra la estación de la perforación para el P01-P02.



Figura 3.1 Acción de perforaciones geotécnicas P-01 (posición izquierda) y P02 (posición derecha).

3.2.1. Ensayos de laboratorio

Para complementar la información obtenida en el campo, se realizaron ensayos de laboratorio, con las muestras alteradas representativas de cada sondeo.

Adicionalmente, se tomaron muestras parafinadas para ensayo de corte directo en todos los sondeos, pero debido al material suelto no se pudieron realizar los ensayos. Entre los ensayos realizados se tiene.

3.2.2. Clasificación de suelos con el método SUCS.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (ASTM D 2487 y 2488) es el de uso más extendido en la práctica geotécnica. Fue inicialmente propuesto por Arthur Casagrande en 1932, tentativamente adoptado por el Departamento de ingeniería de los EEUU en 1942 y definitivamente presentado a la ASCE en 1948 (Casagrande, 1932-1948). La U.S. Army Corps of Engineers comenzó a emplearla en 1953 en tanto que la U.S. Bureau of Reclamation lo hizo en 1974. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) de los suelos.

La primera y más importante decisión está dada por el contenido de finos, definido como el correspondiente a partículas de diámetro equivalente menor a 0,075 mm, pasante del tamiz #200. Si menos del 50% en peso del suelo pasa el tamiz #200, entonces el suelo es “grueso” y se subclasifica en arena o grava usando el tamiz #4. De otro modo, el suelo es “fino” y se subclasifica en limo o arcilla, usando los límites de plasticidad. (J. Carlos Santamarina, 2015)

Desde el punto de vista del diseño, la velocidad de disipación del exceso de presión de poros discrimina entre análisis en condiciones “drenadas” o en condiciones “no drenadas”. Típicamente, las condiciones de carga “drenadas” están asociadas a suelos de grano grueso, en tanto que las de carga “no drenadas”, a suelos de grano fino. Sin embargo, un suelo de grano grueso, pero con la presencia de sólo ~10% de finos ve afectada grandemente su permeabilidad, haciendo que su valor cambie en órdenes de magnitud. Consecuentemente, el SUCS tiene un rango del 5% al 12% de contenido de finos que modifica la clasificación de suelos. En efecto, un suelo granular con relación de vacíos $e=0,6$ colmata su espacio intersticial con 5% a 15% de finos. En la ausencia de finos, el empaquetamiento de granos en suelos gruesos (gravas o arenas) depende del coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10}$; este determina las máximas y

mínimas relaciones de vacío que un determinado suelo granular puede alcanzar. El coeficiente de curvatura $C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ agrega información acerca de la convexidad de la curva granulométrica, indicando la presencia de diámetros extremos. (J. Carlos Santamarina, 2015).

En el Cantón, se presentan formaciones de acuerdo con su ubicación en la cordillera occidental, los valles interandinos o la cordillera oriental o Real, de carácter volcánico que van desde formaciones constituidas por piroclastos primarios y retrabajados en el cuaternario, estrato volcánico y domos constituidos por flujos de lavas dacíticas, andesíticas.

3.2.3. Límites de Atterberg

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de humedad. El contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado líquido a uno plástico se define como límite líquido (LL). De manera similar, el contenido de humedad, en porcentaje, en el que el suelo cambia de un estado plástico a uno semisólido y de un estado semisólido a uno sólido se definen como límite plástico (LP) y límite de contracción (LC), respectivamente. A estos límites se les refiere como límites de Atterberg Figura 1.6. (Braja M, 2011)

El límite líquido de un suelo se determina utilizando la copa de Casagrande (designación de prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de humedad en el que se cierra una ranura de 12.7 mm mediante 25 golpes.

El límite plástico se define como el contenido de humedad en el que el suelo se agrieta al formar un rollito de 3.18 mm de diámetro (designación de prueba D-4318 de la ASTM). (Braja M, 2011)

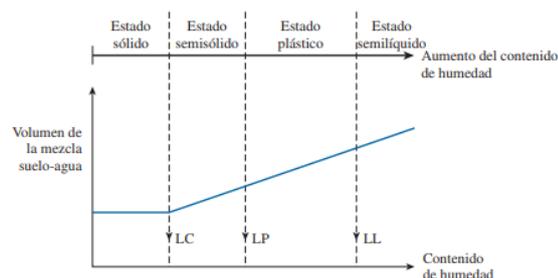


Figura 3.2 Definición de los límites de Atterberg (Braja M, 2011)

El sistema Unificado de Clasificación, clasifica los suelos en dos amplias categorías:

Suelos de grano grueso que son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S. G significa grava o suelo gravoso y S significa arena o suelo arenoso.

Los suelos de grano fino con 50% o más pasando por la malla No. 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M, que significa limo inorgánico, C para arcilla inorgánica u O para limos y arcillas orgánicos. El símbolo Pt se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación: W: bien graduado, P: mal graduado, L: baja plasticidad (límite líquido menor que 50), H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50).

Tabla 3.1
Símbolos de grupo clasificación SUCS incluyendo Prefijos y Sufijos

Tipo de Suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien gradada	W
Arena	S	Pobremente gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto (>50)	H
Turba	Pt	Límite líquido bajo (<50)	L

Fuente: Braja M Das

Para la realización de los ensayos de límite líquido y límite plástico se tomaron muestras de suelo, pero debido al material no se pudieron realizar los ensayos en todas las capas excepto en la perforación P-01, que en su primer estrato a una profundidad de 1- 1.45 metros respectivamente, se obtuvieron valores de límite líquido de 25,11% y límite plástico de 23,21%, el resto de estratos salieron NP.

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.)
INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		NOMBRES TÍPICOS		CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO		
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 @ Las partículas de 0.075 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMGO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVAS LIMPIAS Poco o nada de partículas finas	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD C_u : mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA C_c : entre 1 y 3. $C_u = D_{60} / D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA G.W. LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. $C_u = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6 ; $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.	
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMGO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GRAVA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	GP		Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
			ARENA LIMPIA Poco o nada de partículas finas	SW		Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos
		ARENAS CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	ARENA CON FINOS Cantidad apreciable de partículas finas	SM		Arenas limosas, mezclas de arena y limo.
				SC		Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.
		SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 @ Las partículas de 0.075 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50	ML		Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arcillosos o arcillosos ligeramente plásticos.
	CL			Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas en grava, arcillas arcillosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		
	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.		
			MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diazómicos, más elásticos.		
	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas finas.		
			OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		
	P		Turbas y otros suelos altamente orgánicos.			

Figura 3.3 Sistema unificado de clasificación de suelos

3.2.4. Parámetros mecánicos del suelo

3.2.4.1. Ensayo SPT

El ensayo SPT o ensayo de penetración estándar se realiza en suelos o en rocas muy alteradas y meteorizadas en el interior de los sondeos durante la perforación. Es el ensayo más usado y extendido de los que se realiza en el interior de un sondeo, por tal razón el ensayo SPT incluye diversas correlaciones con parámetros mecánicos del suelo en conjunto con datos y parámetros de laboratorio. Consiste en definir (contar) el número de golpes que son necesarios para hincar (conseguir la penetración) una toma muestras partido en 30 centímetros del terreno.

3.2.4.2. Ángulo de Fricción

El ángulo de rozamiento interno o ángulo de fricción es una propiedad de los materiales granulares el cual tiene una interpretación física sencilla, al estar relacionado con el ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de dicho material granular. En un material granuloso cualquiera, el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y la forma de las partículas, pero en un material sin cohesión y donde las partículas son muy pequeñas en relación al tamaño del conjunto el ángulo de reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno. Es especialmente importante en mecánica de suelos para determinar tanto la capacidad portante como la resistencia al deslizamiento de un terreno arenoso.

3.2.4.3. Cohesión

La cohesión del suelo se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto, como resultado de la trabazón conjunta o las microestructuras existentes en el suelo.

3.2.5. Parámetros físicos del suelo

3.2.5.1. Humedad

Las determinaciones del contenido de agua son necesarias para todos los tipos de suelos, en condiciones que varían desde la saturación hasta la humedad higroscópica y en una cantidad tan pequeña que, para el ojo, la muestra parece estar seca. También se requieren como parte de muchas de las pruebas más elaboradas.

La humedad o contenido de humedad de un suelo es la relación expresada como porcentaje, del peso del agua en una masa dada de suelo, al peso de la partícula sólida.

3.2.5.2. Plasticidad

Se trata de una identificación basada en el ensayo de determinación de límite plástico. Consiste en amasar una muestra húmeda sobre una superficie plana, moldeándola para obtener un cilindro de 3 mm de diámetro. Si la muestra puede amasarse hasta conseguir dicho diámetro sin desboronares, se considera que presenta plasticidad, en caso contrario, es de naturaleza no plástica.

3.2.6. Determinación de los períodos de vibración del suelo utilizando el método Nakamura

Los períodos de vibración del suelo son de vital importancia para el cálculo estructural de cualquier obra civil; sin embargo, al momento se cuenta con ensayos y

fórmulas empíricas para su cálculo. De este hecho nace la necesidad de llevar a cabo ensayos de campo más precisos y la correspondiente interpretación de datos mediante el método Nakamura que llevará a obtener resultados más confiables y sumamente reales del parámetro estudiado.

Para la realización del presente proyecto se cuenta con el equipo apropiado, un sismógrafo marca SARA, el asesoramiento técnico de expertos y la teoría antes mencionada para la interpretación de los datos obtenidos. El ensayo a realizar es un complemento al SPT y ayudará a determinar los parámetros de estudio necesarios dando como resultado períodos de vibración del suelo reales.

Los puntos de ensayo se encuentran en el cantón PELILEO y fueron seleccionados no por su ubicación, sino más bien por los diferentes tipos de suelos que se encontraron en cada uno de estos puntos. Una buena estimación de estos períodos ayuda al ingeniero civil a tomar las consideraciones pertinentes en la cimentación de una estructura, ya ésta aislada o no, lo cual repercute directamente en el costo de la construcción.

3.2.7. Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico

Los parámetros utilizados según la Normativa Ecuatoriana de construcción NEC-15, Capítulo Riesgo Sísmico, para definir los tipos de perfiles de suelos para diseño sísmico A, B, C, D y E son en esencia los valores de la velocidad de las ondas de corte hasta los 30 m de profundidad.

Tabla 3.2
Tipos de perfiles de suelos para el diseño sísmico

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil tipo roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil roca rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s > 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante	$760 \text{ m/s} > V_s > 360 \text{ m/s}$
D	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180 \text{ m/s}$
E	Perfil que cumple el criterio de velocidad de la onda de cortante	$V_s < 180 \text{ m/s}$

Fuente: (NEC, 2015)

3.2.8. Método Nakamura

El método fue propuesto en 1989 y puesto en práctica en Japón por primera vez, su base geodinámica está basada en la hipótesis de que un micro temblor compuesto por ondas principales de onda y por ondas superficiales Rayleigh, todas ellas provocadas por agentes externos como autos, trenes u otros, además se considera que el registro de ondas captadas es similar en la base rocosa del suelo estudiado.

Se ha observado que los daños causados por la ocurrencia de un terremoto no solo dependen de su magnitud y distancia epicentral, sino también de los efectos del sitio local que son esencialmente dependientes de la frecuencia causados por la topografía, el espesor de los sedimentos, las condiciones del suelo y la geología del área. La reacción de las condiciones geológicas locales a la energía sísmica entrante se conoce como la respuesta del sitio (Fernandez, 2000).

Para la evaluación de riesgo sísmico, el efecto del sitio suele representarse por la frecuencia de resonancia y la amplificación de movimiento de tierra asociada. Existen varios métodos, como el análisis de datos de matriz, el método de Nakamura de relación horizontal / vertical H / V de ruido ambiental, relación espectral de sitio a referencia y análisis de tipo de función del receptor. Fuera de estos, el método de Nakamura, es decir, el uso de registros de ruido ambiental para la determinación de la frecuencia de resonancia fundamental, recientemente ha ganado aceptación mundial debido a la rápida adquisición de datos. La cantidad de amplificación depende de varios factores, como el espesor de la capa, el grado de compactación y la edad (Siddiqj, 2002)

La propuesta es tomar registros de frecuencia de onda en la capa superficial, la teoría sostiene que estas ondas son amplificadas por la capa de suelo blando ubicadas sobre la base rocosa. En referencia a la relación espectral H/V, su componente horizontal se amplifica por multirreflexiones de ondas S, mientras que la componente vertical hace otro tanto por multirreflexiones de ondas P.

Como se mencionó con anterioridad, se captan además de ondas principales, ondas ambientales o superficiales de Rayleigh, estas ondas no son de relevancia en muchos casos debido a que no se propagan a estratos profundos del suelo, el método de Nakamura propone que no afecten al resultado final del estudio, para lo cual recurre a principios matemáticos.

Desde el punto de vista matemático, Nakamura propuso algunos postulados:

- “Las ondas Rayleigh sólo afectan a la parte superior del nivel y en cambio no afectan a la base del nivel de suelo.” (Sandoval Gomez, 2013)
- “El efecto de la onda Rayleigh es igual en superficie para el movimiento vertical y horizontal.” (Sandoval Gomez, 2013)

Una de las muchas razones para elegir el ruido ambiental por varios autores es que permite la estimación rápida y confiable de las características del sitio de cualquier tipo de área. Además de ser una medida rentable, reduce el tiempo en comparación con la estimación de las características del sitio a partir de terremotos, lo que siempre es un proceso costoso y costoso en lo que se refiere al mantenimiento del equipo y la fuerza humana (Rajib Biswas, 2011)

Es importante resaltar que, como resultado de todo estudio, de forma preliminar, se obtiene una gráfica que contrapone la relación espectral antes descrita y las frecuencias captadas del suelo por medio de los equipos disponibles.

3.2.9. Geodinámica y sus relaciones

Para una mejor comprensión la Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo de Peligro sísmico expone algunas relaciones que describen de forma matemática el comportamiento de los distintos tipos de suelo ante agentes externos que provocan su movimiento.

A continuación, se presentan las principales relaciones para el método:

$$Ts(seg) = \frac{4 * H}{Vs(H)}$$

(NEC, 2015)

Donde H será la profundidad o espesor de la capa de suelo estudiado, mientras que Vs (H) se refiere la velocidad de onda de corte a la misma profundidad. Esta relación permite comparar los períodos obtenidos con el método Nakamura como se describió con anterioridad, con aquellos obtenidos por ensayos de SPT en los puntos de estudio.

En relación a los puntos de estudio, también destaca la siguiente fórmula:

$$V_{s30} = \frac{d}{\sum_{i=1}^k \frac{d_i}{V_{si}}} (m/seg)$$

(NEC, 2015)

La fórmula anterior se refiere al ensayo de campo y posterior análisis de datos, donde se obtendrá perfiles de cizalla activos y pasivos, para calcular el verdadero valor de Vs a una determinada profundidad se debe tomar en cuenta ambos perfiles.

3.2.10. Ensayo y datos obtenidos en campo

El equipo utilizado para los ensayos de campo es un sismógrafo marca Sara, modelo Geobox, capaz de captar de forma simple las ondas de vibración ambientales de los puntos; su funcionamiento está relacionado con los campos magnéticos de la tierra.

Los registros obtenidos serán transmitidos a un computador con el programa de la misma marca SEISMOWIN, mientras que la interpretación de los mismos se desarrolló en el programa GEOEXPLORER HVSR VERSION 2.2.3.

Se toman los datos de frecuencia del pico más alto, y se repite el proceso para todas las lecturas.

Destaca la transformación del dato obtenido por el programa GEOEXPLORER que es la frecuencia medida en Hertz al período medido en segundos. La fórmula es simple:

$$\text{Período (seg)} = \frac{1}{\text{Frecuencia (Hz)}}$$

(NEC,2015)

3.2.11. Tipos de normas de construcción con parámetros sísmicos

La peligrosidad sísmica predominante en el área de influencia directa del cantón Pelileo, hace necesaria realizar la microzonificación del suelo aplicando las Normas NEC 2015 CÓDIGO NEC-SE-DS, numeral 10.5. “Procedimientos para caracterización sísmica del sitio”.

Para lo cual se han determinado en base a la medición de los parámetros resultantes de sondeos geofísicos como herramienta fiable para la caracterización geotécnica del suelo de cimentación en el caso de zonas urbanas. Específicamente se han realizado ensayos sísmicos de 1) adquisición de datos de fuente activa y 2)

adquisición de datos de fuente pasiva MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) basado en el estudio de ondas superficiales, en el texto se identifican como Líneas sísmicas activas y Líneas sísmicas pasivas.

Los lugares escogidos fueron, en parque y terreno municipal por la facilidad de accesos.

Esta clase de estudio se ha elaborado en base a las investigaciones de campo y trabajo de gabinete únicamente para los sitios donde se ha realizado el ensayo. Al final se llega a determinar un valor de $V_s 30$, La Norma ecuatoriana NEC – 2015 propone una clasificación de perfiles sísmicos de suelos basada en el estudio de la velocidad de ondas de corte $V_s 30$ conforme a la tabla 3.3.

Tabla 3.3
Clasificación de perfiles sísmicos de suelos basada en la velocidad de ondas de corte NEC-15

perfil de suelo	descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$V_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ m/s $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > V_s \geq 180$ m/s $50 > N \geq 15.0$ $100 \text{ kPa} > S_u \geq 50$ kPa $V_s < 180$ m/s
E	Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. Se contemplan las siguientes subclases: F1.-Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75)	

F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 30\text{m}$)

F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte.

F6—Rellenos colocados sin control ingenieril.

$$\alpha = \frac{\rho_s v_s}{\rho_o v_o}$$

ρ_s es la densidad promedio; V_s es la velocidad de la onda de corte; ρ_o es la densidad del estrato con impedancia; V_o es la velocidad de onda de corte del estrato crítico

V_s es la velocidad de la onda de corte en los primeros 30 m. (V_{s30}); N es el número de golpes del ensayo de penetración estándar (N_{60}); S_u es la resistencia media al corte; IP es el índice de plasticidad; w es el contenido de agua en porcentaje.

Fuente: (NEC, 2015)

3.2.12. Clasificación de Suelos del Euro código

Las tres normativas sísmicas EC8, IBC (2000) y NEC-15, define en los perfiles de suelo en función de V_{s30} , como parámetro principal complementando con valores del número de golpes N del ensayo SPT, el índice de plasticidad IP y la resistencia al corte no drenado S_u .

Tabla 3.4
Clasificación de Suelos del Euro código

perfil de suelo	Descripción del perfil estratigráfico	Parámetros		
		V_{s30} (m/s)	N-SPT	S_u (Kpa)
A	Roca u otra formación geológica similar a una roca, que incluye como máximo 5 m, de material más débil en la superficie	>800	-	-
B	Depósitos de arena muy densa, grava o arcilla muy rígida, de al menos varias decenas de metros de espesor, caracterizados por un gradual de la resistencia mecánica propiedades con profundidad	360-800	>50	>250
C	Depósitos profundos de arena densa o medianamente densa, grava o arcilla rígida con espesores de varias decenas o cientos de metros	180-360	15-50	70-250
D	Depósitos de suelos cohesivos flojo o medio (con o sin algunas capas blandas cohesivas), o de suelos cohesivos predominantemente suave o firme	<180	<15	<70
E	un perfil de suelo que consiste en un capa de aluvión de superficie con valores V_s de tipo C o D y un espesor que varía entre aproximadamente 5 y 20 m, con un material más rígida con $V_{s30} > 800$ m/s			

S1	Depósito que consisten, o contienen una capa de al menos 10 m de espesor, de arcillas / limos suaves con un alto índice de plasticidad (IP>40) y alto contenido de agua	<100 (indicativo)	10 a 20
S2	Depósito de suelos licuables, de arcillas sensibles o cualquier otro perfil de suelos no incluidos en los tipos A-E o S1		

Fuente (Rajib Biswas, 2011)

Los valores V_{s30} y N_{60} se hallarán con las siguientes ecuaciones:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}}$$

$$N_{60} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}}$$

Donde d_i es el espesor del estrato i , localizado dentro de los 30 m, superiores del perfil; V_{si} es la velocidad media de la onda de cortante del suelo del estrato i , medida en (m/s); N_i es el número de golpes obtenidos en el ensayo de penetración estándar, incluyendo corrección por energía N_{60} correspondiente al estrato i . El valor de N_i a emplear para obtener el valor medio no debe exceder de 100. Por otra parte, la resistencia al corte S_u en los primeros 30 metros se halla con la siguiente expresión.

$$S_u = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}}$$

La variable no definida todavía es S_{ui} es la resistencia al corte no drenado del estrato i , que no debe exceder de 2.5 kg/cm².

La NEC-15 recomienda obtener “el período elástico del subsuelo mediante mediciones de la vibración ambiental, aplicado la técnica de Nakamura” Se ha copiado textualmente lo que dice la Norma Ecuatoriana de la Construcción de 2015 pero no dice nada más. Es decir, se reconoce que el período del suelo es un factor importante para clasificar los suelos

3.2.13. Método Sísmico

El método sísmico de prospección del subsuelo se basa en la medida de los tiempos de llegada de las ondas tipo P y S generadas en el terreno por una fuente de energía mecánica adecuada (martillo manual, generador de impactos, etc.), que se

transmiten desde un punto determinado, hasta otro distante en el que se instalan los sensores correspondientes (geófonos) conectados al sismógrafo registrador.

Debido a que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el terreno es distinta para cada tipo de material, la técnica de prospección por refracción permite determinar la profundidad e inclinación de las distintas capas en el subsuelo.

Así mismo, los sismógrafos utilizados para estas técnicas, permiten realizar la medida de la velocidad de propagación de las ondas en el terreno, de cuyo valor se pueden deducir una serie de características tales como el módulo de elasticidad de la formación, la escarificabilidad (en inglés ripability) de las rocas, el grado de compactación o asentamiento de los terrenos, así como otras varias propiedades de interés para la Ingeniería Civil.

Mediante las técnicas de Refracción es posible también determinar las características del subsuelo, midiendo los tiempos de retorno de las ondas generadas en superficie y reflejadas por las discontinuidades del terreno.

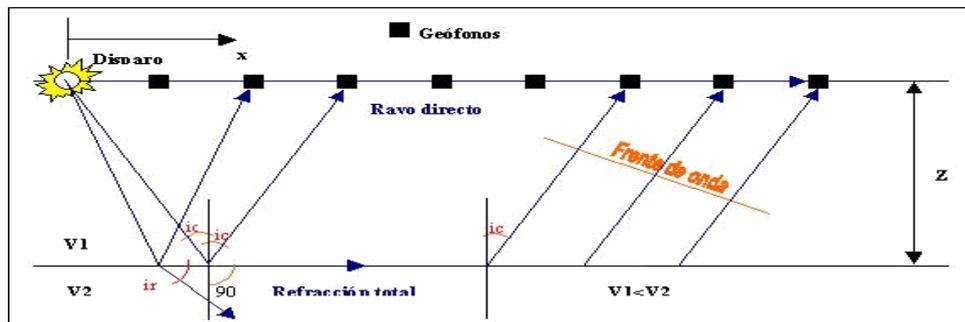


Figura 3.4 Ensayo sísmico de refracción

Debido a los requerimientos presentados en el presente estudio se calculan los perfiles que determinen la profundidad de cizalla hasta los 30 m. de seguridad V_{s30} . El procedimiento a utilizar es el descrito por el método multicanal de ondas superficiales (MASW). Este procedimiento consiste en registrar las ondas superficiales generadas por el golpeo en el terreno, para luego extraerse la curva de dispersión del modo fundamental y los modos superiores en caso de presentarse, finalmente se invierte esta curva en una sección vertical de cizalla, esto es posible debido a que las ondas superficiales toman alrededor del 70% de la energía sísmica total. El método MASW, permite obtener perfiles de ondas S hasta profundidades promedio de 25 m a 30 m.

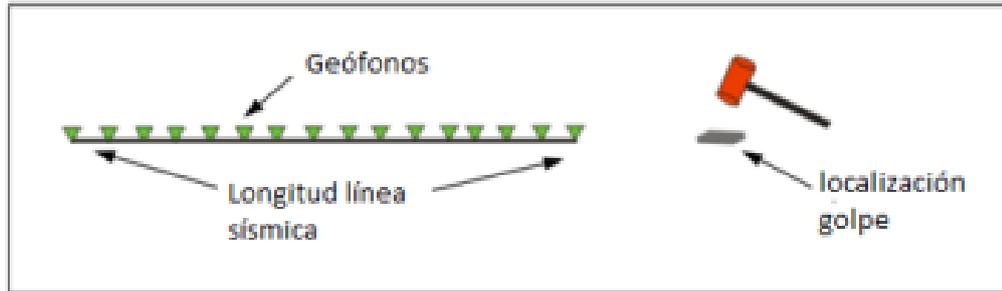


Figura 3.5 Esquema de configuración activa lineal

También se utiliza el método de sísmica pasiva que consiste en hallar la velocidad de las ondas de corte (cizalla) V_s hasta varias decenas de metros de profundidad. Este proceso se lleva a cabo a partir del análisis espectral de las ondas superficiales (MAM) incluidas en el ruido sísmica ambiental producido por el tráfico y otras actividades características de las vidas urbanas (Granda Sanz, 2005). Este método consiste en monitorear vibraciones ambientales en arreglos predeterminados y utilizando el análisis de dispersión determinar el perfil de velocidades de ondas S (V_s).

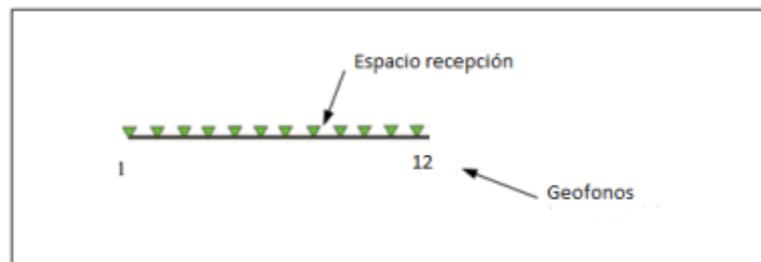


Figura 3.6 Esquema de la configuración para dispersión lineal de fuente pasiva.

La combinación de los métodos MASW y MAM, permiten obtener perfiles de velocidades de ondas S (V_s) hasta profundidades promedio de evaluación entre 50 m a 80 m., permitiendo determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman, obteniéndose el perfil de velocidad de onda de corte (V_s) para el punto central de dicha línea.

Los registros de campo de la señal sísmica se analizan con ayuda de los programas computacionales, (Geometrics, 2005) siguientes:

- Seissimager, recolección de datos de campo.

- Pickwin, para el análisis y ubicación de la geometría y disparos del estudio.
Plotrefa, para análisis de ondas de refracción
- “WaveEq (Surface Wave Analysis)”, para la inversión, velocidad de fase frecuencia 1D, el “modelo de velocidades de onda Vs, el perfil de cizalla, y el valor “Vs30”.

3.2.14. Sitios de ensayo

A continuación, se muestran con fotografías los sitios donde se realizaron los ensayos para posteriormente presentar los resultados de los mismos.

3.2.14.1. Parque Héroes de Paquisha LS1

La línea tiene una longitud de 55 metros



Figura 3.7 Ubicación de las líneas sísmicas en LS1 PARQUE HEROES DE PAQUISHA

3.2.14.2. LS2

La línea tiene una longitud de 55 metros



Figura 3.8 Ubicación de las líneas sísmicas en LS2 PARQUE HEROES DE PAQUISHA

3.2.15. Sector Mercado Mayorista LS3

La línea tiene una longitud de 55 metros



Figura 3.9 Ubicación de las líneas sísmicas en LS3 SECTOR MERCADO MAYORISTA

3.2.15.1.LS4

La línea tiene una longitud de 55 metros



Figura 3.10 Ubicación de las líneas sísmicas en LS4 SECTOR MERCADO MAYORISTA

La tabla 3.5 incluye el detalle de los ensayos sísmicos realizados para cada sitio definidos por las autoridades de Pelileo, la ubicación de las líneas sísmicas de acuerdo a su número de registro. Estos datos serán utilizados en la presente tesis.

Tabla 3.5
Sitios de ensayo

Sitio	Línea Sísmica	Config.	No. Canales	Longitud (m)	ANÁLISIS		
					Vp	Vs	No. Reg.
PARQUE HEROES DE PAQUISHA	Ls1	Lineal	12,0	55,0	Refracción	Activo	13
		Lineal	12,0	55,0	Refracción	Pasivo	20
	Ls2	Lineal	12,0	55,0	Refracción	Activo	13
		Lineal	12,0	55,0	Refracción	Pasivo	20
SECTOR MERCADO MAYORISTA A	Ls3	Lineal	12,0	55,0	Refracción	Activo	13
		Lineal	12,0	55,0	Refracción	Pasivo	20
	Ls4	Lineal	12,0	55,0	Refracción	Activo	13
		Lineal	12,0	55,0	Refracción	Pasivo	20

Se realizó sondeos de exploración geofísica por medio de Sísmica de Refracción según lo recomendado en la norma ASTM D5777-00.

Tabla 3.6
Ubicación sondeos sísmicos

SITIO	LÍNEA SÍSMICA	UBICACIÓN		
		GEÓFONO	COORDENADAS	
			SUR	ESTE
PARQUE HEROES DE PAQUISHA	LS1	G1	9853122	773464
		G12	9853070	773487
	LS2	G1	9853096	773533
		G12	9853069	773492
SECTOR MERCADO MAYORISTA	LS3	G1	9852777	774770
		G12	9852785	774830
	LS4	G1	9852828	774807
		G12	9852768	774824

Se procedió a realizar el análisis de las ondas de compresión V_p y de corte V_s con los métodos Activo y Pasivo en las líneas en las cuales se detalla los resultados de estratigrafía y el perfil de cizalla respectivamente.

3.3. Fase 3. Peligrosidad sísmica y respuesta de sitio.

3.3.1. Espectro de diseño NEC-2015

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (geotecnia y cimentaciones) presenta las actividades que comprenden el reconocimiento de campo, la investigación del subsuelo, los análisis y recomendaciones de ingeniería necesarios para el diseño y construcción de las obras en contacto con el suelo, de tal forma que se garantice un comportamiento adecuado de las estructuras (superestructura y subestructura) para edificaciones, puentes, torres, silos y demás obras, que preserve la vida humana, así como también evite la afectación o daño a construcciones vecinas.

3.3.2. Zonificación Sísmica del NEC-15

En la figura 5.1, se presenta la zonificación sísmica del NEC-15, la misma que está asociada a un período de recurrencia de 475 años. Se tienen 6 zonas sísmicas siendo, la de mayor peligrosidad la costa ecuatoriana con una aceleración máxima del suelo en roca $A_o = 0.5g$. Siendo g la aceleración de la gravedad y la de menor peligrosidad es la región nor-oriental con un valor $A_o = 0.15g$

Para los edificios de uso normal, se usa el valor de Z , que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad.

Para la presente tesis se utilizará el valor de Z proporcionado por la NEC 15 teniendo en cuenta que, para los suelos de pelileo no cumplen con las propiedades de las rocas como la especifica la NEC.

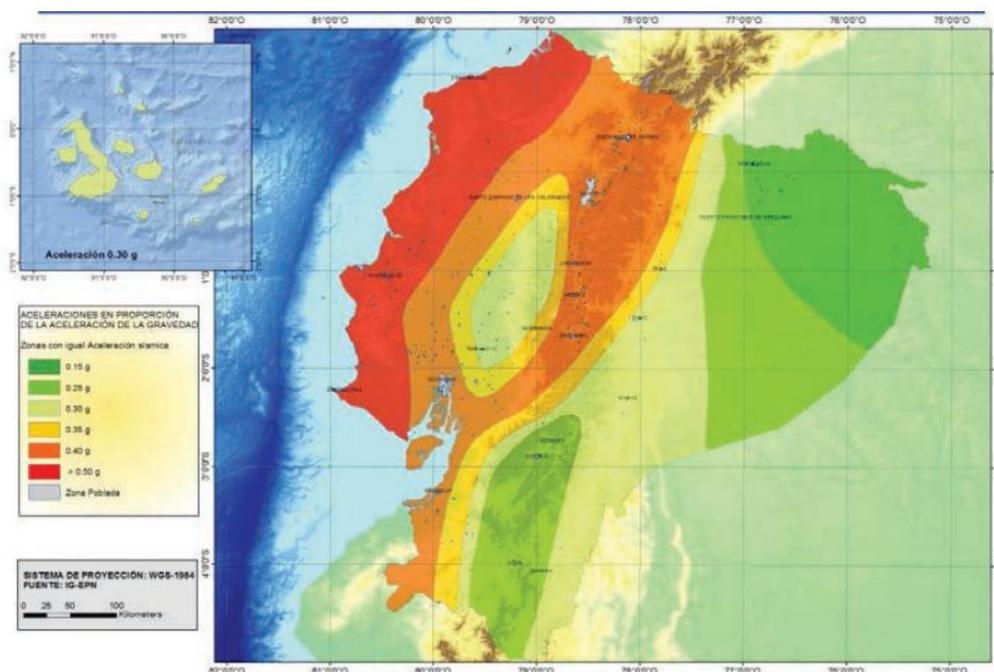


Figura 3.11 zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z (NEC, 2015)

Tabla 3.7

Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy Alta

Fuente: (NEC, 2015)

El mapa de zonificación sísmica para diseño proviene del resultado del estudio de peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años (período de retorno 475 años), que incluye una saturación a 0.50 g de los valores de aceleración sísmica en roca en el litoral ecuatoriano que caracteriza la zona VI.

Para la ciudad de Pelileo, el valor de $A_0 = 0.40g$. En el estudio de Peligrosidad Sísmica que se realizó, para este estudio este valor cambia de acuerdo al sector de la ciudad pero está alrededor de ese valor.

Todo el territorio ecuatoriano está catalogado como de amenaza sísmica alta, con excepción del:

- Nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia,
- Litoral ecuatoriano que presenta una amenaza sísmica muy alta.

3.3.3. Coeficientes de perfil de suelo F_a , F_d y F_s de acuerdo a la NEC.

Para los suelos de tipo F no se proporcionan valores de F_a , F_d ni de F_s , debido a que requieren un estudio especial.

3.3.3.1. F_a : Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de período corto.

En la Tabla 3.10 se presentan los valores del coeficiente F_a que amplifica las ordenadas del espectro de respuesta elástico de aceleraciones para diseño en roca, tomando en cuenta los efectos de sitio.

Tabla 3.8
Tipo de suelo y Factores de sitio F_a

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.4	1.3	1.25	1.23	1.2	1.18
D	1.6	1.4	1.3	1.25	1.2	1.12
E	1.8	1.4	1.25	1.1	1.0	0.85
F	Véase Tabla 3.3 : Clasificación de los perfiles de suelo					

Fuente: (NEC, 2015)

3.3.3.2. F_d : amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca

En la Tabla 3.11 se presentan los valores del coeficiente F_d que amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

Tabla 3.9
Tipo de suelo y Factores de sitio F_d

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
B	1	1	1	1	1	1
C	1.36	1.28	1.19	1.15	1.11	1.06
D	1.62	1.45	1.36	1.28	1.19	1.11
E	2.1	1.75	1.7	1.65	1.6	1.5
F	Véase tabla 3.3 : Clasificación de los perfiles de suelo					

Fuente: (NEC, 2015)

3.3.3.3. F_s : comportamiento no lineal de los suelos

En la Tabla 5 se presentan los valores del coeficiente F_s , que consideran el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del período del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

Tabla 3.10

Tipo de suelo y Factores del comportamiento inelástico del subsuelo F_s

Tipo de perfil del subsuelo	Zona sísmica y factor Z					
	I	II	III	IV	V	VI
	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	≥ 0.5
A	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
B	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
C	0.85	0.94	1.02	1.06	1.11	1.23
D	1.02	1.06	1.11	1.19	1.28	1.40
E	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
F	Véase Tabla 3.3 : Clasificación de los perfiles de suelo					

Fuente: (NEC, 2015)

3.3.4. Componentes horizontales de la carga sísmica: espectros elásticos de diseño

El espectro de respuesta elástico de aceleraciones S_a , expresado como fracción de la aceleración de la gravedad, para el nivel del sismo de diseño, se proporciona en la Figura 3.16, consistente con:

- el factor de zona sísmica Z ,
- el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura,
- la consideración de los valores de los coeficientes de amplificación de suelo F_a , F_d , F_s .

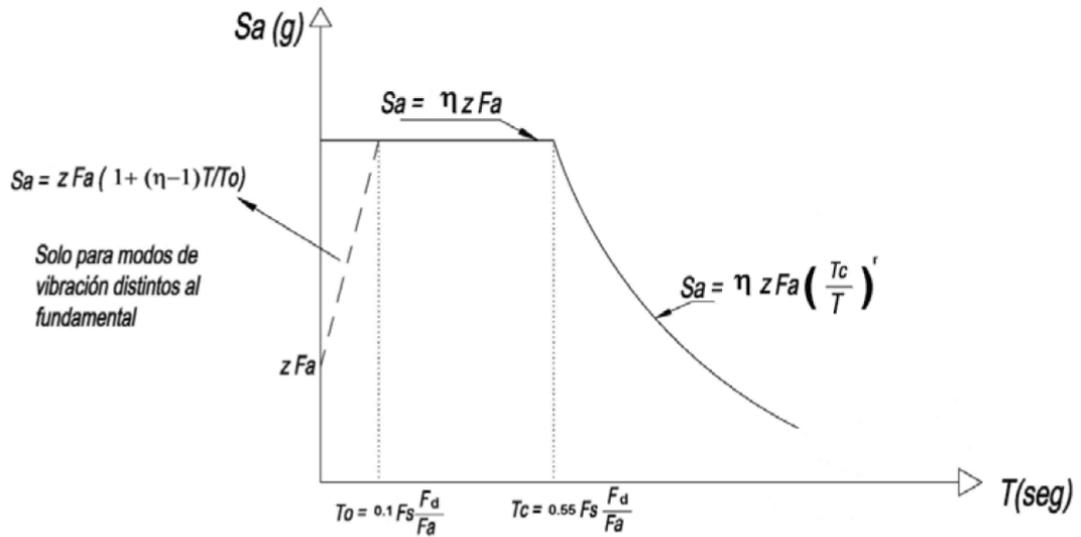


Figura 3.12 Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño (NEC, 2015)

3.3.5. Espectro elástico de diseño en desplazamientos

Para la definición de los desplazamientos espectrales elásticos para diseño, correspondiente al nivel del sismo de diseño, se utilizará el siguiente espectro elástico de diseño de desplazamientos S_d (en metros) definido a partir del espectro de aceleraciones, mediante la siguiente fórmula:

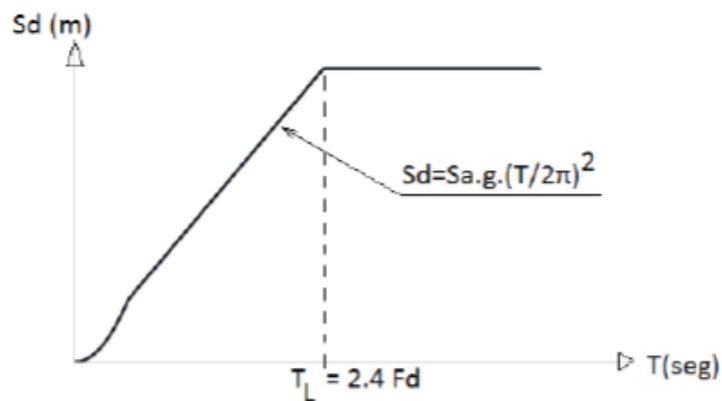


Figura 3.13 : Espectro sísmico elástico de desplazamientos para diseño (NEC, 2015)

Donde los valores de los períodos límite T_0 , T_c y T_L son los mismos que fueran definidos para el espectro elástico de aceleraciones, no obstante, para los perfiles de suelo tipo D y E, los valores de T_L se limitarán a un valor máximo de 4 segundos en los espectros de desplazamientos.

3.4. Fase 4. Estudio de licuefacción para el cantón Pelileo

La susceptibilidad a la licuefacción del suelo depende de la edad de los depósitos y de la profundidad del nivel estático de la capa freática. Por lo general, la licuefacción se refiere a los depósitos del Holoceno donde la profundidad del nivel freático es inferior a 10 m. Según Youd y Perkins (1978), AFPS (1995) y CDMG (1999), un área se caracteriza como una zona de licuefacción cuando cumple uno o más de los siguientes criterios: (i) Evidencia de ocurrencias históricas de licuefacción; Datos de pruebas y análisis in situ que indican que es probable que los suelos se licúen; (iii) Área que contiene suelos de la edad del Holoceno tardío, nivel freático a <13 m de profundidad y la aceleración del movimiento en el suelo (PGA) con una probabilidad del 10% de ser excedida en 50 años mayor que 0.1 g; (iv) Suelos de la edad del Holoceno con una profundidad de la capa freática inferior a 10 m y la probabilidad de PGA (10% en 50 años) mayor que 0.2 g.

3.4.1. Susceptibilidad geotécnica para suelos D, E y F.

Seed et al. (2003), mostraron que los suelos son licuables cuando se controlan principalmente los siguientes criterios: (i) un grado de saturación (S_r) cercano al 100%, (ii) una fracción de fino (FC) inferior al 35%, (iii) El diámetro del tamaño de los granos se encuentra entre 0.05 mm y 1.5 mm, y una granulometría uniforme que corresponde a un coeficiente de uniformidad $C_u < 15$.

Por otro lado, el comportamiento de plasticidad de las partículas de grano fino de los suelos es más importante que la fracción de tamaño de arcilla. Por lo tanto, mostraron que los suelos se consideran probablemente licuables cuando (LL) es inferior al 37% y (PL) es inferior al 12%. Existe una clara distinción entre suelos licuables y no licuables en función de sus límites de liquidez y plasticidad. El análisis muestra que el suelo no licuable coincide con la unidad de margas de Plaisancian y las arcillas contenidas en la unidad de arenas rojas del Pleistoceno, caracterizada por una alta plasticidad. La mayoría de los suelos no licuables muestran valores de (LL) hasta el 60% y valores de (PL) hasta el 40%.

3.4.2. Factores que influyen en el potencial de licuefacción.

Para que un suelo presente licuefacción, los siguientes parámetros son los más relevantes según investigaciones realizadas.

3.4.2.1. Tipo de suelo

Los depósitos de origen aluviales, fluviales, eólicos o rellenos usualmente se sedimentan sin lograr compactarse, las partículas finas ocupan los espacios inferiores y las partículas granulares se ubican en la superficie. En la siguiente tabla se resume la investigación de Kramer (1988) sobre suelos licuados que se observaron en terremotos importantes. Sin embargo, las arenas no son los únicos suelos que se pueden licuar. De acuerdo a la publicación hecha por Kramer, los suelos afectados por licuefacción pueden ser limos, arena, arcillas, y mezclas de ellas. Tabla 3.11

Tabla 3.11

Comparación de registros históricos de suelos involucrados en licuefacción

Deslizamientos de flujo	Descripción del suelo
Puerto Trondheim-Suiza, 1888	Arena fina limosa
Orklasford-Noruega, 1933	Arena fina suelta, limo, arcilla limosa
Hommelivika-Noruega, 1942	Arena fina suelta
Follafjorden-Holanda, 1952	Arena fina suelta, Limos
Rio Mississippi-EUA, 1947	Arena fina suelta, arena fina, media

Fuente: (Collahuazo, Arleth, Cruz, & Rober, 2017)

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DE FALLAS SÍSMICAS Y GEOTÉCNICA VOLCÁNICA

4. Mapa de zonación sísmica por fallas geológicas

4.1. Catálogo de fallas sísmicas y máximas Mw y PGA roca

Ecuaciones de regresiones aplicadas a los parámetros cinemáticos y geométricos de fallas geológicas activas permiten estimar las máximas magnitudes de sismos (Leonard, 2010; Stirling et al., 2013; Wells and Coppersmith, 1994; Wesnousky, 2008) y máximas aceleraciones en rocas (Fukushima and Tanaka, 1990), PGA, *Peak Ground Acceleration*. Relaciones empíricas entre parámetros de longitudes mayores de isosistas de intensidades macrosísmicas y magnitudes han sido empleadas también para determinar la fuente sísmica (Marín et al., 2008). Esta metodología proporciona para este estudio, estimaciones de niveles de sismicidad, en particular para áreas donde la historia de la recurrencia sísmica es insuficiente o con poca información (Chunga, 2010), como lo es la provincia de Tungurahua.

Para el área de estudio de Pelileo han sido seleccionadas 14 fallas activas ubicadas en un radio de 20 a 30 km, los cuales al re-activarse sísmicamente, podría causar daños en las infraestructuras próximas a la fuente sísmica, con máximas magnitudes estimadas de $5.9 \leq M_w \leq 6.5$ y $0.28g \leq PGA \leq 0.34g$. Estas fallas han sido delineadas desde modelos digitales del terreno y de datos de literatura proporcionado por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IGEPN), las estimaciones de Mw y PGA, son resultados en este estudio de tesis. Los sismos distribuidos espacialmente en el territorio cercano a Pelileo y expresado en la figura 4.1 (desde 16 de abril 2016 al 27 de enero 2019), tienen profundidades menores de 15 km, los cuales por sus hipocentros pueden ser asociados con fallas geológicas corticales.

Los niveles de amenaza sísmica (baja, moderada y alta) son establecidos para cada falla estudiada, aplicando el método de Zonación morfo-estructural, como sigue en la siguiente sección de este capítulo.

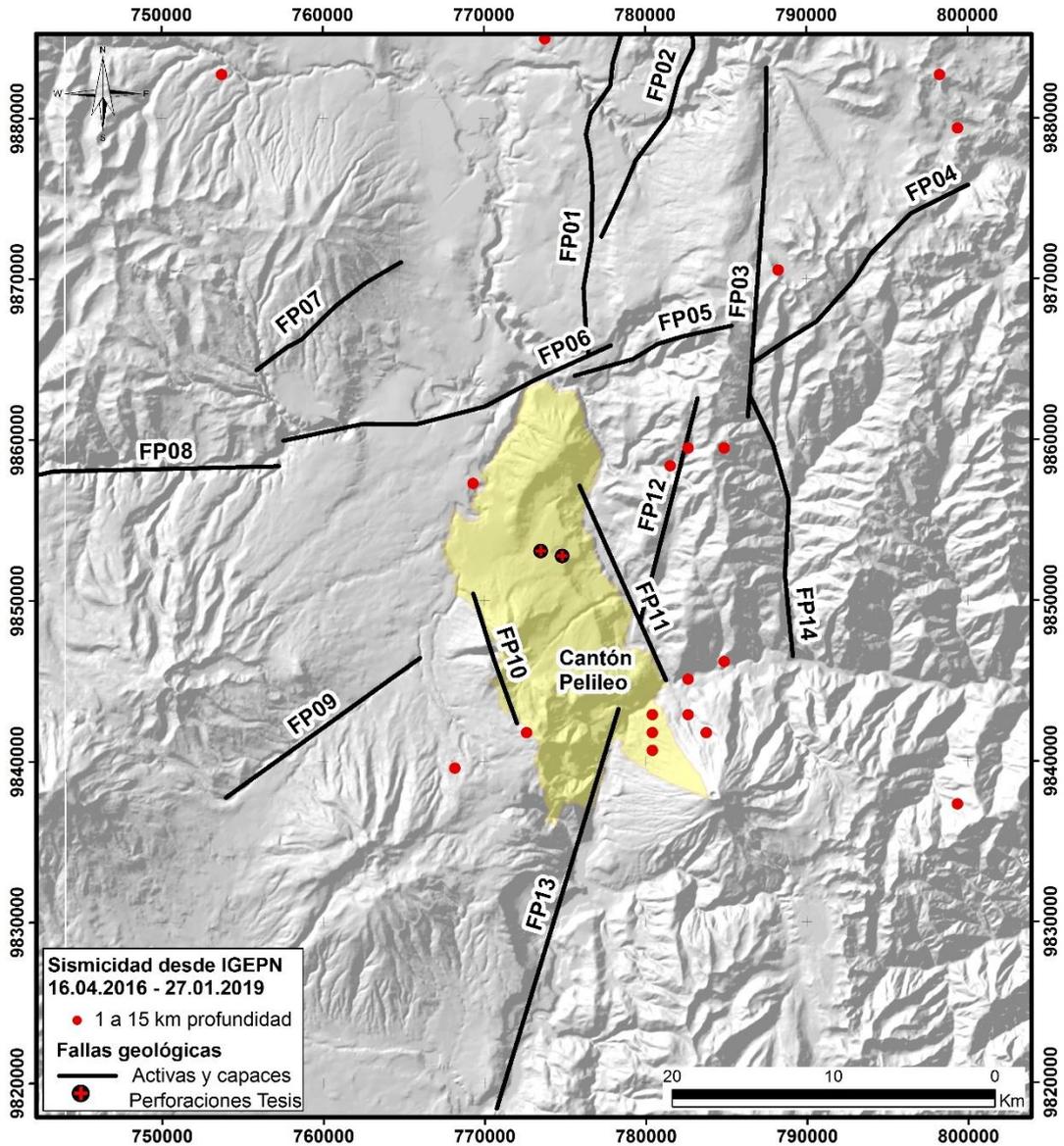


Figura 4.1 Fallas geológicas activas y capaces de generar sismos con magnitud mayor a 6. Sismos superficiales son distribuidos espacialmente en el terreno, de fecha posterior al 16 de abril 2016, posible asociación con actividades de fallas geológicas por su poca profundidad hipocentral. Perforaciones geotécnicas son indicadas en este mapa para la población de Pelileo

En la tabla 4.1, se detallan las características morfo estructural de las fallas geológicas sísmicas que pueden dar lugar a un sismo, que podrían causar daños severos a la población y viviendas del cantón Pelileo. Los lineamientos tienen una dirección SW-NE, EW, principalmente.

Tabla 4.1

Catálogo de fallas geológicas sísmicas delineadas en el territorio cercano a Pelileo, estimando Mw y PGA roca

Falla	tipo	Long. de falla (Km)	Prof. falla (Km)	Distancia a más cercana falla - Pelileo (Km)	Azimut	Buz. Aparen	Rake	Ancho de falla	Máximo desplaz. (m) desde Well & Coppermith, 1994	Magnitud estimada desde Leonard, 2010	Magnitud desde distancia focal de falla	Magnitud desde Wesnousky (2008)	PGA desde Fukushima & Tanaka, 1994	Niveles de Peligrosidad	Bibliografía, referencia citada
FP01	Cizalla sinistral	23,0	10	11	10	85	5	9	1,0	6,4	6,4	6,7	0,34	Bajo	En este estudio
FP02	Inversa	21,0	10	17	15	45	90	8,3	1,0	6,3	6,3	6,6	0,33	Bajo	En este estudio
FP03	Inversa	22	10	13	185	45	+90	8	1,0	6,4	6,4	6,6	0,34	Bajo	Chunga, 2010
FP04	Inversa	16,0	9	17	355	45	90	8	0,9	6,2	6,2	6,4	0,32	Alto	IGEPN
FP05	Inversa	11,0	7	8	20	45	90	7	0,7	5,9	5,9	6,1	0,33	Bajo	En este estudio
FP06	Cizalla sinistral	21	12	7	80	85	5	8	1,0	6,3	6,3	6,6	0,30	Bajo	Ordoñez, 2012
FP07	Normal	11	7	18	45	45	-90	7	0,7	6,0	5,9	6,6	0,34	Bajo	Eguez et al., 2003
FP08	Cizalla sinistral	18	12	18	91	85	+5	8	0,9	6,2	6,2	6,6	0,28	Alto	Chunga, 2010
FP09	Cizalla sinistral	15	12	15	50	85	+5	8	0,8	6,2	6,1	6,6	0,28	Moderado	Chunga, 2010
FP10	Normal	9	8	9	95	45	-90	7	0,7	5,9	5,8	6,6	0,30	Bajo	Chunga, 2010
FP11	Normal	13	8	2	330	45	-90	7	0,8	6,0	6,0	6,2	0,32	Moderado	En este estudio
FP12	Inversa	15	10	9	32	45	+90	8	0,8	6,1	6,1	6,3	0,30	Moderado	Eguez et al., 2003
FP13	Cizalla sinistral	26	13	17	22	85	+5	9	1,1	6,5	6,5	6,8	0,31	Bajo	Chunga, 2010
FP14	Cizalla dextral	17	10	15	345	85	180	8	0,9	6,2	6,2	6,4	0,31	Bajo	Bustillo, 2008

4.1.1. Zonación Morfoestructural – Método Determinístico

Los nudos estructurales son delineados por el método de zonación morfo-estructural, el cual es basado sobre el concepto de que la corteza es construida por bloques de diferentes escalas y estas a su vez son separadas por límites móviles. Estos límites móviles son definidos en geología como fallas activas o capaces.

Para la zonación morfo-estructural, el territorio de Pelileo es dividido en un sistema de áreas ordenadas jerárquicamente (por escala), caracterizada por la homogeneidad de la presente topografía y de las dominantes estructuras tectónicas expresadas en el terreno (Chunga, 2010). Tres tipos de morfo-estructuras son distinguidas por zonación morfo-estructural: (1) Bloques de diferentes escalas, (2) zonas delimitando los bloques llamados lineamientos estructurales, y (3) sitios donde las zonas de límites son interceptadas, llamadas nudos estructurales (intersección de fallas geológicas).

En el área de estudio de Pelileo, la topografía es principalmente analizada en término de su morfometría, definiendo los siguientes rasgos topográficos, tales como: (a) elevación, orientación y pendiente de la topografía, (b) redes de drenaje y sus variaciones estructurales, (c) elementos lineales de la superficie del terreno, tales como segmentos rectilíneos de ríos, incisiones profundas, escarpadas, entre otras, forma visible en las imágenes satelitales y modelos digitales del terreno.

Zonación morfo-estructural es ordenada jerárquicamente en bloques de diferentes escalas y sus zonas limitantes son asignadas como lineamientos de primer a tercer orden. Desde un punto de vista de la orogénesis, la estructura regional como las cadenas montañosas de los Andes septentrionales en Ecuador, son consideradas como la unidad de más alta jerarquía siendo definida como de primer rango; en zonación morfo-estructural son llamadas “mountain countries”. Esta unidad es dividida en unidad de segundo rango, llamada mega-bloques. Estos mega-bloques, son subdivididos a su vez en áreas de tercer rango, llamados bloques. Los colindantes bloques deberían diferir por lo menos en uno de las tres consideradas características de la presente topografía.

Como producto del estudio morfo-estructural se obtuvo el modelo de zonación para Pelileo y el detalle se muestra en la figura 4.2.

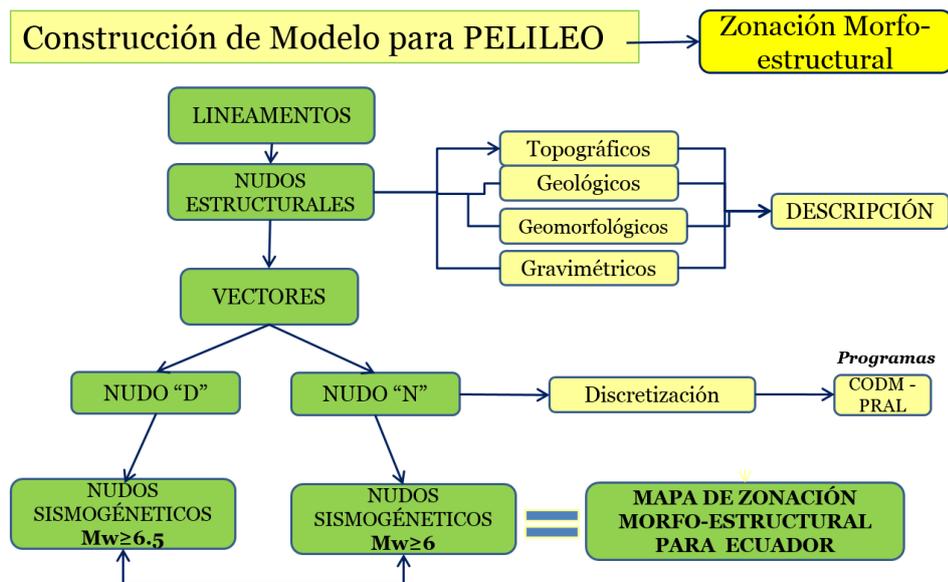


Figura 4.2 Construcción de un modelo de zonación morfo-estructural para la ciudad de Pelileo considerando 50 km y 20 km de radio.

La zona limitante es de primer, segundo o tercer rango de jerarquía, dependiendo del orden de su estructura a escala dominante, respectivamente. Con respecto a la tendencia regional de las estructuras tectónicas y topografía, dos tipos de zonas limitantes son distinguidas para cada orden: (1) lineamientos estructurales longitudinales, y (2) lineamientos estructurales transversales. Los lineamientos transversales son aproximadamente paralelos a la tendencia regional de las estructuras tectónicas y de la topografía que incluye largos segmentos de fallas activas y capaces. Lineamientos transversales interceptan la tendencia regional de las estructuras tectónicas y de la topografía. Estas últimas aparecen sobre la superficie del terreno como discontinuas y son representadas por escarpes tectónicos, por segmentos rectilíneos de redes fluviales y parcialmente por fallas geológicas.

4.1.2. Reconocimiento de Nudos Sismogénicos

En un contexto metodológico, el primer procedimiento de análisis es dividir los nudos estructurales en dos clases: nudos donde terremotos con $M \geq 6,5$ pueden acontecer (clase D) y nudos donde tales magnitudes de terremotos no pueden generarse (clase N). Usando la información documentada en el catálogo de terremotos corticales (CERECIS, IGEPN) y proyectando el área epicentral en 20 Km de radio, se ha individualizados preliminarmente los Nudos D (o clase D). Cada nudo describe los parámetros topográficos, geomorfológicos, gravimétricos y geológicos.

Los valores de cada parámetro son representados como vectores que pueden ser asociados a cada nudo estructural. Estos valores son clasificados en clases D y N

usando la técnica “*Pattern Recognition*”, que es definida como el algorítmico CORA-3 (Gelfand et al., 1987; Gorshkov et al., 2002; Chunga, 2010).

El algoritmo selecciona los rasgos característicos D y N para las clases D y N, usando los modelos iniciales de D_0 (desde D) y N_0 (desde N). Cada rasgo característico de los nudos incluye uno, dos o tres componentes con sus respectivos valores de distribución espacial (ie. Gorshkov et al., 2002). En esta fase de clasificación, el algoritmo cuenta los números de rasgos D y N (n_D y n_N , respectivamente) que cada nudo posee y le asigna a la clase D si $n_D - n_N \geq \Delta$ o a la clase N si $n_D - n_N < \Delta$, donde Δ es un parámetro del algoritmo.

Los rasgos característicos para cada clase D y N han sido seleccionados, donde, l es el número de los componentes de los vectores binarios que representan el nudo estructural. Los rasgos de la matriz A es definida como:

$$A = \begin{bmatrix} i_1 & i_2 & i_3 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 \end{bmatrix}$$

Donde i_1, i_2, i_3 , son números naturales, tales como $1 \leq i_1 \leq i_2 \leq i_3 \leq l$ y $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ son igual a 0 o a 1. En este estudio los nudos (vectores binarios) son enumerados como (i):

$$\omega^i = (\omega^i_1, \omega^i_2, \omega^i_3)$$

Y tienen una característica A de,

$$\omega^i_{i_1} = \delta_1, \omega^i_{i_2} = \delta_2, \omega^i_{i_3} = \delta_3$$

Los rasgos característicos han sido seleccionando usando cuatro parámetros del algoritmo:

$$k_1, \bar{k}_1, k_2, \bar{k}_2.$$

El valor W es el conjunto de todos los nudos considerados en el análisis y $K(W, A)$ el número de los nudos $\omega^i \in W$, el cual tiene un rasgo A. El rasgo A es un rasgo característico de la clase D si $K(D_0, A) \geq k_1$ e $K(N_0, A) \leq \bar{k}_1$, y el rasgo A es un rasgo característico de la clase N si $K(N_0, A) \geq k_2$ e $K(D_0, A) \leq \bar{k}_2$.

La clasificación subsecuente es, para cada nudo ω^i el número n_{Di} de los rasgos característicos de la clase D, el número n_{Ni} de los rasgos característicos de la clase N, y la diferencia $\Delta_i = n_{Di} - n_{Ni}$ es calculada. D incluye los nudos ω^i , para el cual $\Delta_i \geq$

Δ . Los nudos en el cual $\Delta_i < \Delta$ se le ha asignado a $N. \Delta$, así como $k_1, \overline{k_1}, k_2, e \overline{k_2}$ es un parámetro del algoritmo.

Aplicando el algoritmo “Cora-3”, es necesario convertir las descripciones geológicas, topográficas y gravimétricas en vectores binarios para subsecuentemente poder discretizar y codificar la información. En matemáticas, discretización se refiere al proceso de la transferencia continua de modelos y ecuaciones en discreto contrapartes, y a la transformación de continuas ecuaciones diferenciales en discreto ecuaciones de diferencia, conveniente para el computar numérico.

El valor de cada parámetro es dividido en dos o tres segmentos para especificar uno o dos umbrales de la discretización. Este procedimiento permite la pérdida de información, sin embargo, se obtiene el resultado del reconocimiento más estable a la incertidumbre de datos. En un umbral de dos intervalos de discretización, se considera para el componente real, el cual se convierte en un componente binario con el valor 11 (“pequeño”), 01 (“medio”) o 00 (“grande”).

Los parámetros utilizados en el proceso de reconocimiento de los rasgos característicos y correspondientes al umbral de discretización son indicados en la Tabla 4.2. Como resultado de la aplicación del modelo se tiene que para el sector geográfico de Pelileo, los nudos sismogénicos capaces de generar terremotos con $M_w \geq 6$ han sido identificados con el algoritmo $k_1=13, (k_1=1)^-, k_2=16, (k_2=0)^-$, mientras para los nudos sismogénicos capaces de generar terremotos con $M_w \geq 6.5$ fueron identificados con el algoritmo $k_1=15, (k_1=2)^-, k_2=11, (k_2=0)^-$.

Tabla 4.2

Parámetros morfo-estructurales de discretización obtenidos en este estudio desde la aplicación de la técnica “Pattern Recognition”.

Parámetros	Umbral de discretización	
Máxima altitud, Hmax	1237	2877
Mínima altitud, Hmin	213	812
Mínima distancia (ℓ) entre los puntos Hmax y Hmin	17	
Contraste altitudinal en el relieve, $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$	909	1900
Pendiente, $\Delta H / \ell$	55	110
Combinación de dominantes formas topográficas, Mor	1	4
Porcentual de depósitos Plio-Cuaternarios, Q	0	15
Máxima anomalía de Bouguer, Bmax	-90	
Mínima anomalía de Bouguer, Bmin	-150	
Desgravación de energía, $\Delta B = B_{\max} - B_{\min}$	40	
Principal valor de la anomalía de Bouguer, $B_m = (B_{\max} + B_{\min})$	-155	-55
“Free-air anomaly”, $H_B = 0.1H_{\max} + B_{\min}$	54	120
Más alto rango de lineamiento cercano al nudo, RL	0	2
Número de lineamientos en el nudo, ηL	2	
Distancia desde el nudo al más cercano lineamiento de primer rango, r_1	1	21
Distancia desde el nudo al más cercano lineamiento de Segundo rango, r_2	50	124
Distancia desde el nudo a la más cercana intersección, r_{int}	10	15

El parámetro Mor, es igual a uno de los siguientes seis valores de acuerdo con la morfología dentro de cada nudo:

1. Separada por un valle longitudinal y por montañas, (m/m)
2. Contacto entre Montaña y planicie de piedemonte, (m/p)
3. Contacto entre Montaña y colinas de piedemonte, (m/pd)
4. Contacto entre montaña, colinas de piedemonte, y planicie de piedemonte, (m/pd/p)
5. Contacto entre planicies de piedemonte, (p/p)
6. Contacto entre colinas de piedemonte y planicies de piedemonte, (pd/p)

4.2. Mapa de zonación geológica - geotécnica

4.2.1. Estratigrafía de suelos volcánicos de Pelileo

Las condiciones geomorfológicas del sector de Pelileo permiten observar a través de cortes de carreteras, las secuencias estratigráficas del sector. Se observan claramente escarpes en forma de herraduras y terrazas relacionadas a deslizamientos. Terrazas altas con superficies planas posiblemente debidas a la deposición en superficie de flujos de lodo, (lahares volcánicos) que se destacan a ambos flancos del río Patate. Pelileo resulta construido sobre una alternancia de depósitos de lahares y caídas de cenizas y lapillos provenientes de los volcanes de Huisla y Tungurahua.

Además, en la secuencia general se encuentran niveles de la Cangahua, unidad marcadora guía volcanoclasticos en el sector andino del Ecuador.

La base de la secuencia estratigráfica de Pelileo (parte baja del poblado), se observa en el sector del relleno sanitario. El acantilado tiene una altura de 60-70 metros y es constituido por secuencias métricas de lahares, grises hasta marrón claro, masivos y litificados, con múltiples diaclasamientos que muestran una inestabilidad en el talud. En la matriz se observan bloques de hasta el metro de diámetro, algunos de estos caídos en el pie de acantilados. Los diferentes niveles de lahares están separados, entre ellos, por niveles centimétricos/decimétrico de caídas de cenizas (algunos niveles tienen una mediana de lapillos). Estos niveles aparecen masivos, blanquecidos con pumita blanca rica en piroxenos y anfíboles.



Figura 4.3 Sector relleno sanitario, en la parte baja del poblado de Pelileo, donde se pueden observar las alternancias de lahares con niveles de caídas de cenizas blanquecinas.

En el techo del acantilado, la secuencia tiene una coloración amarilla típica de la formación Cangahua, observándose en la base de la sección estratigráfica, cubiertas por depósitos de lahares más recientes (UTM WGS84 774713 - 9853049).



Figura 4.4 techo de la secuencia estratigráfica de Pelileo con alternancia de lahares por encima de nivel de lapillos de caída. En la foto el tutor Prof. Kervin Chunga.

Secuencia de lahares masivos son evidenciados en la base de la sección, marrón claro y niveles de cenizas blanquecinas. Se observan vesículas redondas y bajas presencias de fragmentos líticos (<5%). En bibliografía, esta unidad es reconocida como formación Cangahua y es interpretada como niveles de origen volcánicas retrabajadas. Esta unidad se divide de la que está encima por un contacto neto. El depósito suprayacente es un depósito de lapillo negro, de masivo a estratificado con alto porcentaje de fragmentos juveniles (90%), no vesiculado angulosos a subangulosos. La cantidad de fragmentos líticos es muy baja y hay ausencia de cristales libres. Los diferentes niveles están relacionados a múltiples actividades volcánicas del Tungurahua con eventos de “grainflow”, debido a deposición de los piroclastos en topografía inclinada.



Figura 4.5 Secuencia de lapillos negros relacionados a erupción de Tungurahua

La secuencia sigue con un nivel de 30 cm blanquecino, masivo, bien clasificado con vesículas esféricas milimétricas. Presentes fragmentos líticos milimétricos angulosos de origen lávico. Este nivel es un evento de lahar por desmovilización de un depósito de ceniza blanquecina fina. Los últimos tres metros de la secuencia son depósitos de flujos de escombros masivos, mal clasificados a matriz de ceniza media. En el depósito son presentes bloques hasta los 40 cm de origen lávico de subanguloso a angulosos.

CAPITULO V

RESULTADOS

5. Resultados

Después de haber realizado todos los ensayos geotécnicos y sísmicos correspondientes, paso a paso descritos en el capítulo de acuerdo a todas las fases correspondientes, con respecto a las perforaciones que se hicieron en el cantón Pelileo se obtuvo los siguientes resultados cuyo detalle se describe a continuación:

5.1. Estructuras Sismogénicas (fuentes sísmicas) corticales capaces de generar sismos con $M \geq 6$ y con efecto de daños severos en el cantón Pelileo

Como se indicó anteriormente, para el área de estudio de Pelileo han sido seleccionadas 14 fallas activas ubicadas en un radio de 20 a 30 km, de todas estas fallas geológicas, se seleccionaron las más cercanas al cantón pelileo.

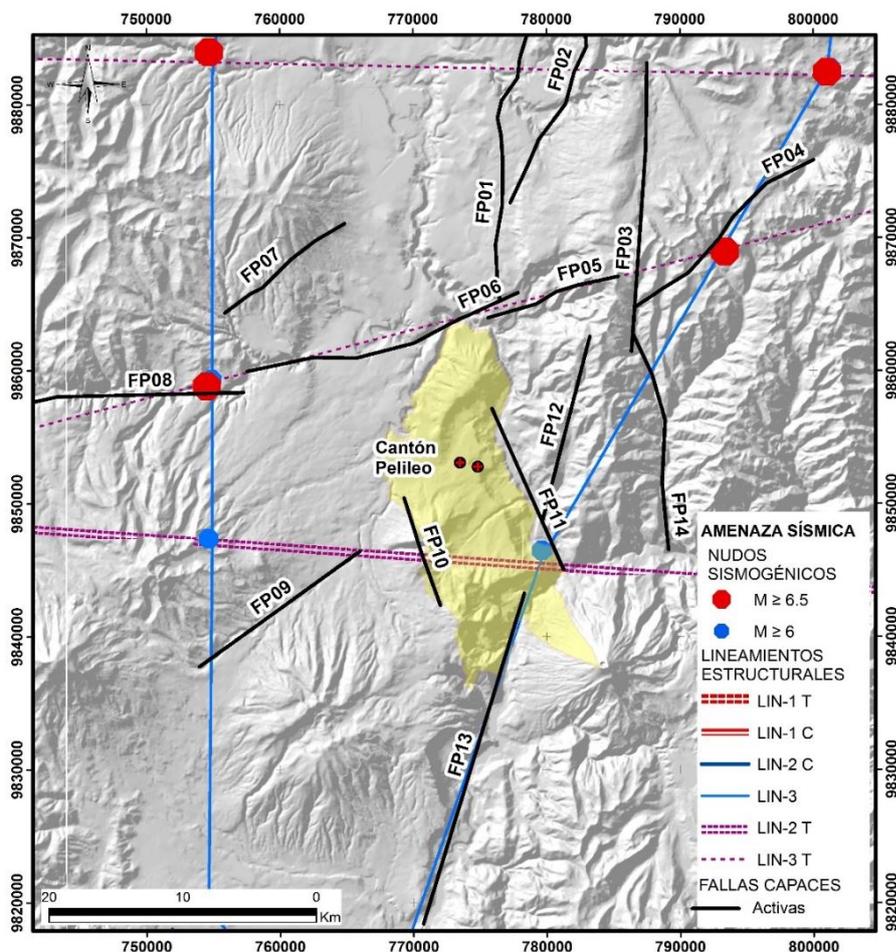


Figura 5.1 Construcción de un modelo de zonación morfo-estructural para la ciudad de Pelileo considerando 50 km y 20 km de radio.

Las fallas corticales tienen abreviaciones FP01 hasta FP14. La falla más próxima al poblado de Pelileo es la FP12, con una distancia sitio-falla de 2 km, pudiendo alcanzar magnitudes de Mw6 y Mw6.2 con PGA 0.32 g, pero cercanas al cantón, se encuentra las fallas FP04-FP08, con niveles de peligrosidad alta (Tabla 5.1), y las fallas FP09-FP11-FP12, con niveles de peligrosidad moderada. La falla con mayor longitud de 26 km, es la FP13 con estimación de $6.5 \leq Mw \leq 6.8$ y PGA 0.31g, ubicada a 17 km de distancia del poblado de Pelileo. Al cantón Pelileo cruza un nudo sismogénico con magnitud moderada.

Con esta técnica determinística de peligrosidad sísmica, se puede identificar que fallas tienen niveles de actividad alta y moderada, seleccionando fallas para posteriores análisis de respuesta de sitio y espectros de diseños.

Tabla 5.1

Fallas sísmicas con niveles de actividad moderada y alta

Falla	Longitud de falla (Km)	Prof. falla (Km)	Distancia más cercana falla - Pelileo (Km)	Magnitud estimada desde Leonard, 2010	Magnitud desde distancia focal de falla	Magnitud desde Wesnousky (2008)	PGA desde Fukushima & Tanaka, 1994	Niveles de Peligrosidad
FP04	16	9	17	6,2	6,2	6,4	0,32	Alto
FP08	18	12	18	6,2	6,2	6,6	0,28	Alto
FP09	15	12	15	6,2	6,1	6,6	0,28	Moderado
FP11	13	8	2	6,0	6,0	6,2	0,32	Moderado
FP12	15	10	9	6,1	6,1	6,3	0,30	Moderado

5.2. Características geológicas y geotécnicas de los depósitos cuaternarios.

Este trabajo integra, por primera vez en el área, los aspectos geológicos y geotécnicos de los suelos del cantón Pelileo. En consecuencia, los parámetros geotécnicos detallados se dan con respecto a las Tablas (1–6) incluidas en el anexo.

Pelileo está asentado sobre depósitos volcánicos del pleistoceno; avalanchas de escombros volcánicos, flujos piroclásticos producto de la actividad principalmente de los volcanes Carihuairazo (Tungurahua) y posteriores depósitos del Huisla.

El substrato donde se depositaron los productos volcánicos corresponden a la formación Latacunga que consisten en unidades de ambientes fluviales, lacustres y volcánicos; el sustrato más reciente corresponde el depósito de Ignimbritas de formación Chalupas. Existe incertidumbre respecto a los espesores de las avalanchas de escombros y sus volúmenes se miden en km^3 . También se observan depósitos de Cangagua en superficie.

Para la perforación geotécnica P01, trabajaremos en la tabla de resumen de resultados obtenidos de acuerdo a la SUCS en el cantón Pelileo (véase en anexo 1). La perforación se dividió, en este estudio de tesis, en diferentes unidades litológicas descritas a continuación:

En la perforación P-01, el suelo en el primer metro de profundidad está compuesta por suelo residual volcánico con cobertura vegetal.

A una profundidad de 1-3 metros el suelo está compuesto por una presencia de cenizas y lahares. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad muy bajo de 22,49% y la compacidad muy suelta, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo contiene una plasticidad baja, con un NSPT promedio de 26,6 y un ángulo de fricción interna promedio de 36,3°.

A una profundidad de 3-8 metros el suelo está compuesto por presencia de suelos laháticos recientes. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad muy bajo de 21,69% y con una consistencia de muy rígida a dura, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 36,16 y un ángulo de fricción interna promedio de 36,25°.

A una profundidad de 8-15 metros el suelo está compuesto por presencia de suelos laháticos antiguos. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad muy bajo de 22,65% y con una compacidad de firme a densa, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 51,6 y un ángulo de fricción interna promedio de 38,25°.

A una profundidad de 15-18 metros, el suelo está compuesto por suelos laháticos con nivel de pumitas en un 40%. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad 32,3% y con una compacidad de densa a muy densa, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 46,25 y un ángulo de fricción interna promedio de 39°.

A una profundidad de 18-21 metros, el suelo está compuesto por suelos laháticos. En detalle, el suelo es de un color café gris, con un contenido de humedad 16,12% y con una compacidad muy densa, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 61,25 y un ángulo de fricción interna promedio de 40,25°.

A una profundidad de 21-30 metros, el suelo está compuesto alternancia de suelos laháricos con avalancha de detritos. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad 25,06% y con una compacidad muy densa, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 69,8 y un ángulo de fricción interna promedio de 41°.

A continuación, se muestra un esquema del perfil estratigráfico, obtenido en la perforación P01 realizado en el Parque Héroes de Paquisha.

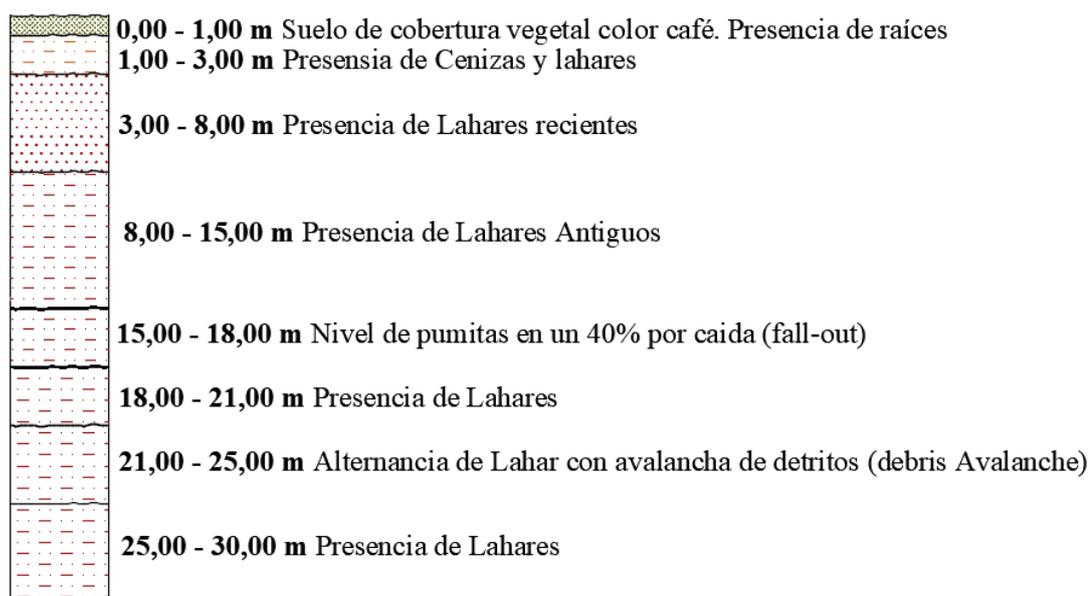


Figura 5.2 Estratigrafía del cantón Pelileo, perforación P01 Parque Héroes de Paquisha

De la misma manera se obtuvieron los siguientes resultados para la perforación geotécnica P02 realizada en el Sector Mercado Mayorista (ver anexo 2)

En la perforación P-02, el suelo en los primeros 4 metros de profundidad está compuesta por suelos residuales con mayores espesores a la P-01, con presencia de cenizas y lapillos. En detalle, el suelo es de un color café oscuro, con un contenido de humedad muy bajo de 12,61% y la compacidad de suelta a firme, con respecto a las propiedades mecánicas, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 19,75 y un ángulo de fricción interna promedio de 35,5°.

En una profundidad de 4,00-5,00 metros de profundidad, el suelo está compuesto por Lahares recientes. Detallando, el suelo es de color café oscuro, con un contenido de humedad de 23,5%, y una consistencia dura, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 54 y un ángulo fricción interna de promedio de 41°.

A una profundidad de 5,00-7,00 metros de profundidad, el suelo está compuesto por lahares antiguos. El suelo es de color café claro, con un contenido de humedad de 18,25%, compacidad muy densa, el suelo es no plástico, con un NSPT promedio de 50,33 y un ángulo de fricción interna promedio de 39,67°.

A una profundidad de 7,00-15,00 metros el suelo está compuesto por lahares con nivel de pumita blanca. Detalladamente, el suelo es de color café claro, con un contenido de humedad promedio de 31,48%, compacidad muy densa, el suelo es no plástico, con valor promedio de NSPT de 46,5 y un ángulo de fricción interna de 38,8°.

A una profundidad de 15,00-20,00 metros, es un suelo con alternancia de lahares con avalancha de detritos y lepillo negro. En detalle, el suelo es de color café claro, con un contenido de humedad de 44,04%, compacidad muy densa, el suelo es no plástico, con un valor promedio de NSPT de 33 y un ángulo de fricción interna promedio de 37,4°.

A una profundidad de 20-22 metros, está compuesto por un suelo lahárico con presencia de avalanchas de detritos. En detalle, el suelo a esta profundidad es de color café claro, con un contenido de humedad de 23,49%, con una consistencia muy rígida, el suelo es no plástico, con un valor promedio de NSPT de 49,3 y un ángulo de fricción interna promedio de 41°.

A una profundidad de 22-30 metros el suelo está compuesto por lahares. En detalle, el suelo a esta profundidad es de color café gris, con un contenido de humedad promedio de 36,98%, con una compacidad muy densa, el suelo es no plástico, con un valor promedio de NSPT de 66,25 y un ángulo de fricción interna promedio de 41°.

A continuación, se muestra un esquema del perfil estratigráfico, obtenido en la perforación P02 realizado en el Sector Mercado Mayorista.

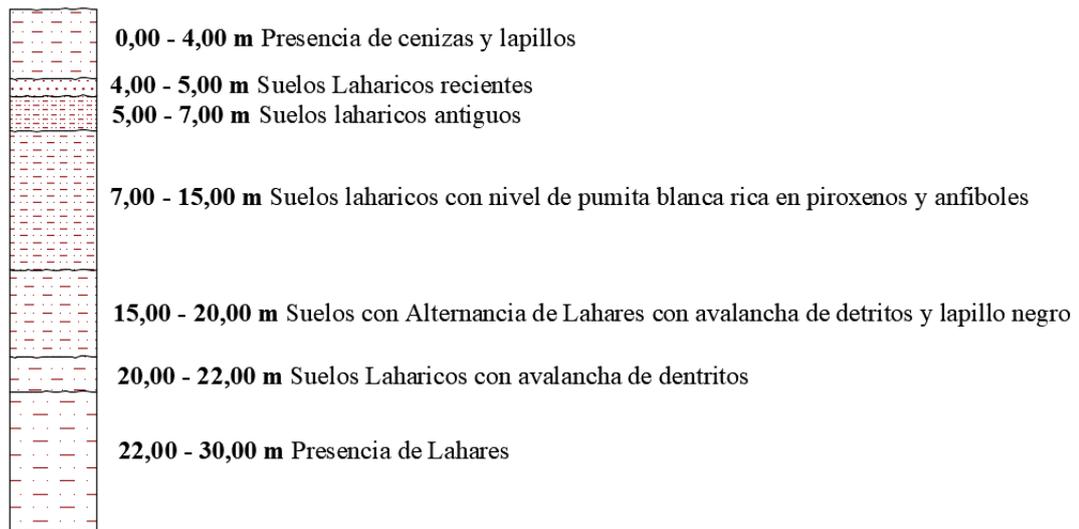


Figura 5.3 Estratigrafía del cantón Pelileo, perforación P02 Sector Mercado Mayorista

5.3. Períodos de vibración del suelo utilizando el método Nakamura, en el cantón Pelileo

En las figuras del numeral 5.3.1 y 5.3.2 se muestran los registros ya procesados, dando como resultado un pico característico, lo cual era esperado; además, todas las condiciones y relaciones del programa están cumpliéndose correctamente, basta con revisar la parte derecha de la pantalla, donde se pintan las casillas de color verde.

Finalmente, se toman los datos de frecuencia del pico más alto, y se repite el proceso para todas las lecturas.

A continuación, se describen los sitios, donde se realizaron los ensayos sísmicos que se ubicaron en parques o canchas de futbol para facilitar el acceso y realización de los mismos. Estos ensayos sísmicos fueron costeados por Risk Safety.

5.3.1. P01 parque héroes de Paquisha (Sector Pelileo Nuevo)

El ensayo sísmico se realizó en el Parque Héroes de Paquisha como se aprecia en la parte superior izquierda de la figura 5.4; a la derecha se muestran las señales sísmicas que sirvieron para el cálculo y en la parte inferior los espectros de Fourier que conducen la obtención de: f_{peak} , A_{peak} y el período de vibración del suelo. En el ensayo se detectó que el período tiene un valor $T= 1.022$

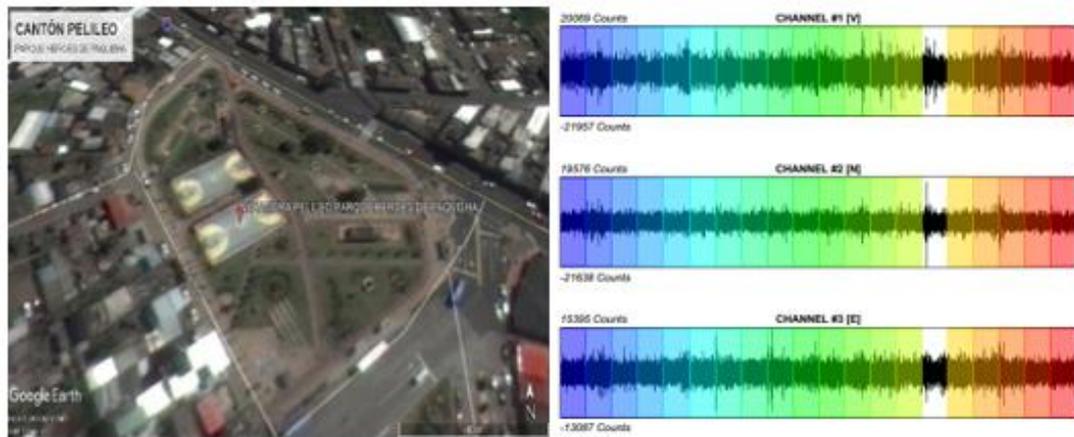


Figura 5.4 señales sísmicas obtenidas en el punto P01

SESAME CRITERIA

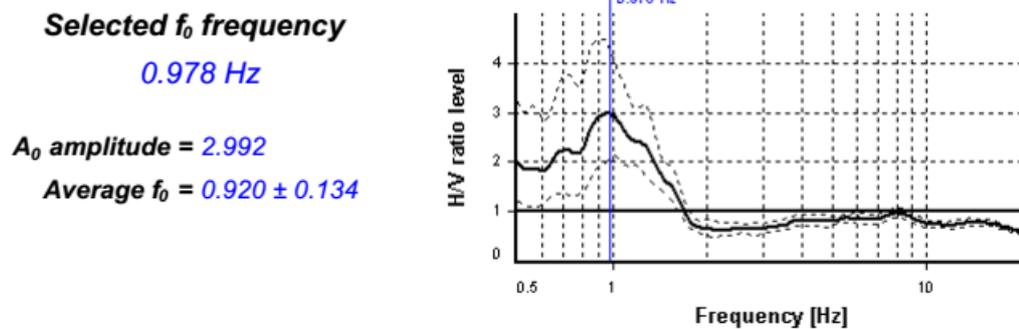


Figura 5.5 Sitio Parque Héroes de Paquisha. Espectros de Fourier

5.3.2. P02 sector mercado mayorista (Sector Pelileo Viejo)

El ensayo sísmico se realizó a una cuadra del mercado mayorista como se aprecia en la parte superior izquierda de la figura 5.6; a la derecha se muestran las señales sísmicas que sirvieron para el cálculo y en la parte inferior los espectros de Fourier que conducen la obtención de: f_{peak} , A_{peak} y el período de vibración del suelo. En el ensayo se detectó que el período tiene un valor $T= 1.187$

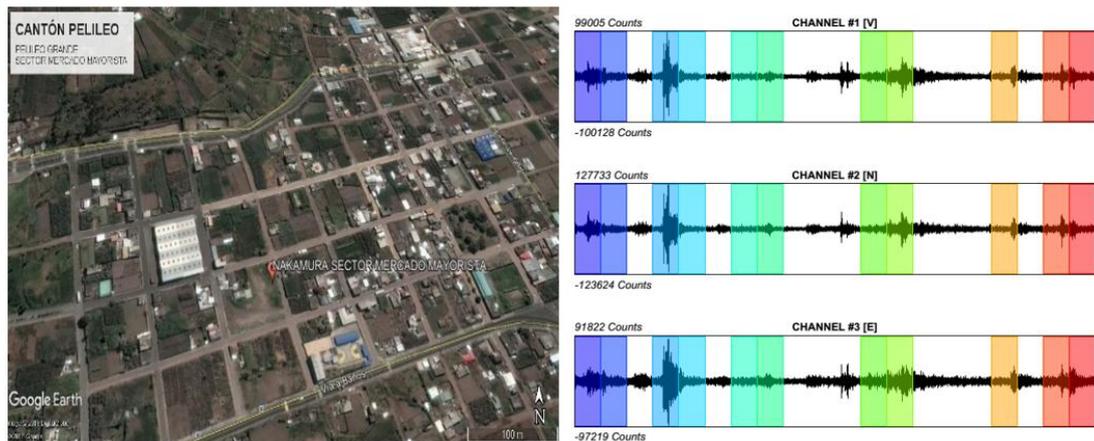


Figura 5.6 señales sísmicas obtenidas en el punto P02

SESAME CRITERIA

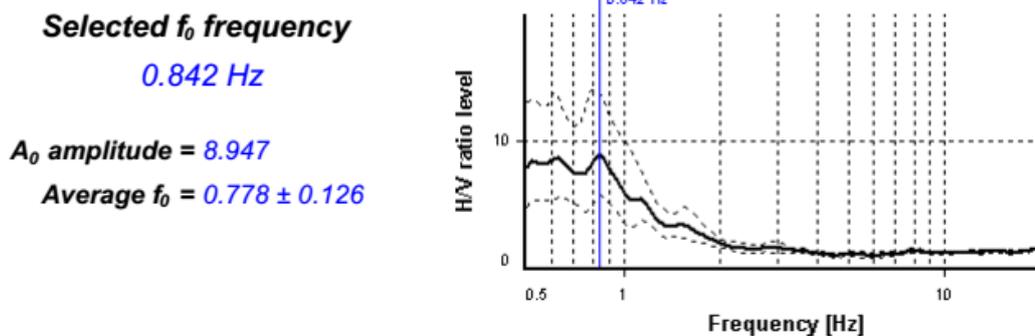


Figura 5.7 Sitio Sector Mercado Mayorista. Espectros de Fourier

5.3.3. Resumen de los resultados obtenidos

Los valores de f_{peak} , A_{peak} y el período del suelo T se resumen en la tabla 5.2, se aprecia que los valores de T , son altos lo que significa que son suelos de Pelileo Viejo y Pelileo Nuevo son susceptibles ante las acciones sísmicas. No obstante, no se debe perder de vista que los sitios donde se han realizado rellenos sin supervisión técnica, debido a que ante una amenaza sísmica son más propensos a sufrir daños.

Un relleno muy bien realizado, colocando buen material y compactándolo en forma adecuada es un suelo bueno y eso se verá reflejado al obtener un período de vibración bajo.

Tabla 5.2
Valores de f_{peak} , A_{peak} , y Períodos de los suelos de Pelileo

Código	Lugar	f_{peak} (Hz)	A_{peak}	T (s)
P01	Parque Héroes de Paquisha	0.978	2.992	1.022
P02	Sector Mercado Mayorista	0.842	8.947	1.187

Es importante destacar que los períodos de vibración indicados en la tabla 5.2, son en el rango elástico; es decir el suelo no se deforma. Ahora bien, cuando se tiene un sismo o un terremoto el suelo incursiona en el rango no lineal o inelástico y los períodos de vibración del suelo son mayores.

5.4. Velocidades de la Onda de Corte (V_{s30}) por medio de estudios geofísicos para suelos geotécnicos característicos en el cantón Pelileo

La realización de este estudio tiene como objetivo levantar sondeos sísmicos para caracterizar el perfil de suelo bajo la cimentación de las estructuras aplicando métodos activo y pasivo para determinar la velocidad de ondas de corte V_{s30} . Se procedió a realizar el análisis de las ondas de compresión V_p y de corte V_s con los métodos Activo y Pasivo en las líneas en las cuales se detalla los resultados de estratigrafía y el perfil de cizalla respectivamente, los cuales se presentan a continuación.

En este apartado únicamente se presentan los resultados obtenidos, del cálculo de la velocidad de la onda de corte V_{s30} y velocidades de la onda de corte a profundidades de 30 m, de profundidad. En (Bonifaz, 2018) se tiene el detalle del cálculo el mismo que se lo realizó de tres formas: i) Base de datos de fuente activa; ii) Base de datos de fuente pasiva; iii) Combinación de los resultados hallados con el método activo y con el pasivo; son estos últimos valores encontrados los que se indican en este apartado.

Los resultados analizados en esta sección, son datos elaborado por el ing. Juan Haro, Hugo Bonifaz, y en conjunto con la empresa Risk & Safety.

5.4.1. P01 Parque Héroes de Paquisha (Sector Pelileo Nuevo)

En la figura 5.8 se indica la ubicación vista en planta por medio de google earth de los geófonos, la tabla 5.3 se indican las coordenadas de las dos líneas sísmicas realizadas en el Parque Héroes de Paquisha.



Figura 5.8 Ubicación del sitio seleccionado para el estudio de sismica de refracción Parque Héroes de Paquisha

Tabla 5.3

Coordenadas de las líneas sísmicas en P01 Parque Héroes de paquisha

SITIO	LÍNEA SÍSMICA	GEÓFONO	COORDENADAS SUR	COORDENADAS ESTE
PARQUE HEROES DE PAQUISHA	LS1	G1	9853122	773464
		G12	9853070	773487
	LS2	G1	9853096	773533
		G12	9853069	773492

En las figuras 5.9 a la 5.14 se presentan los resultados de las dos líneas sísmicas de acuerdo al método activo, pasivo, y combinado.

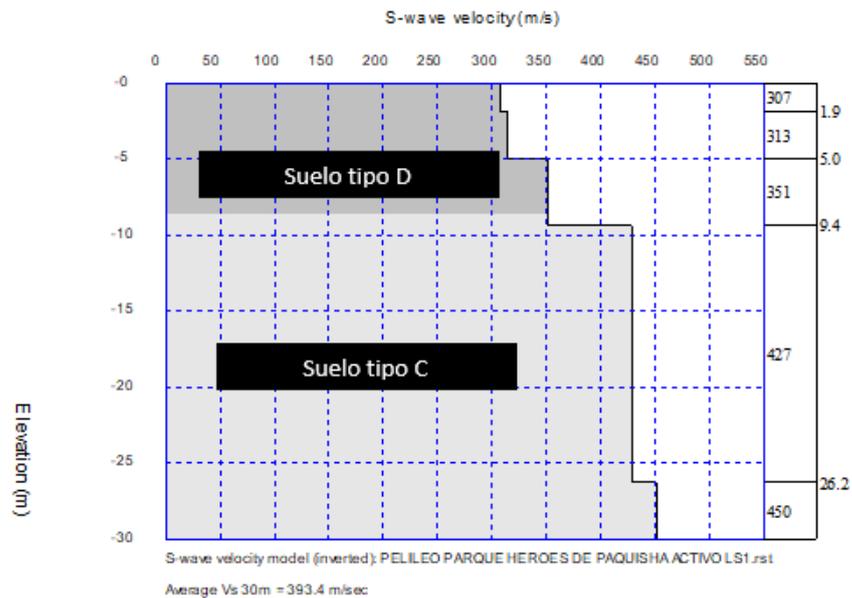


Figura 5.9 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1

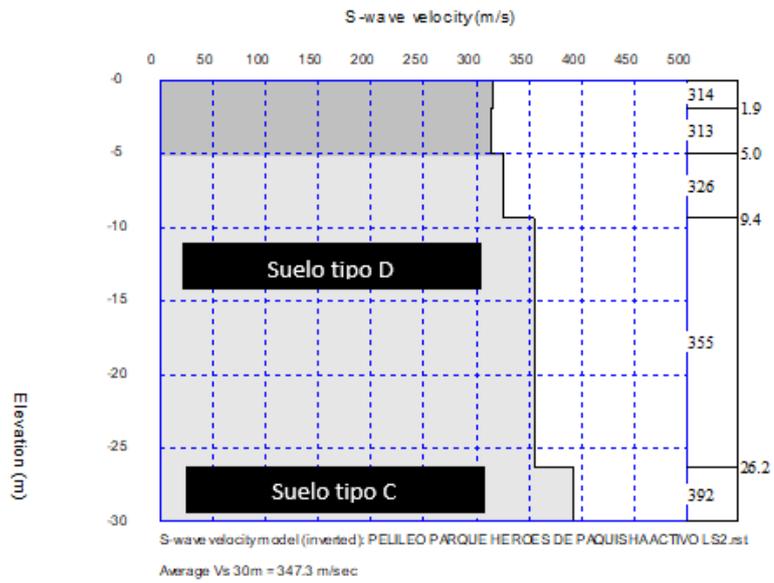


Figura 5.10 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2.

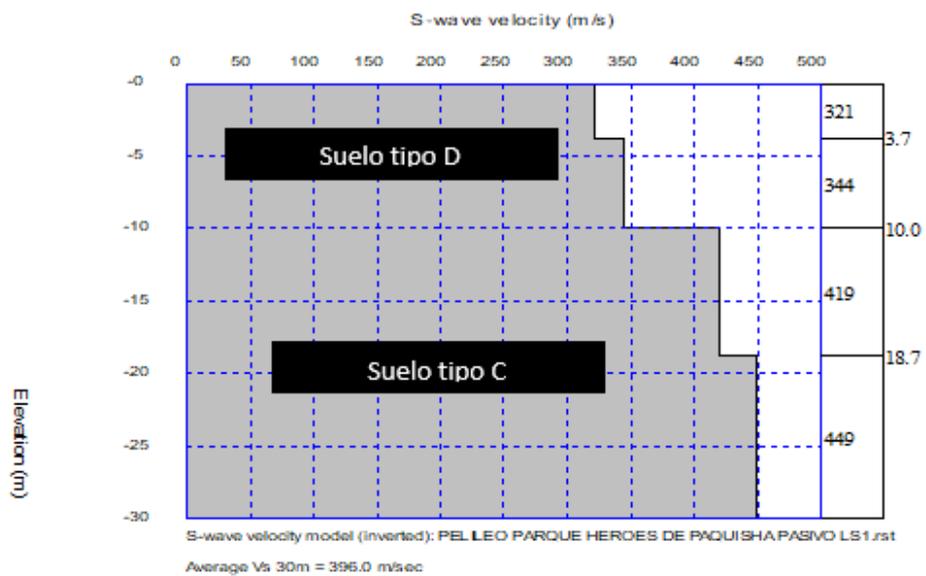


Figura 5.11 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1

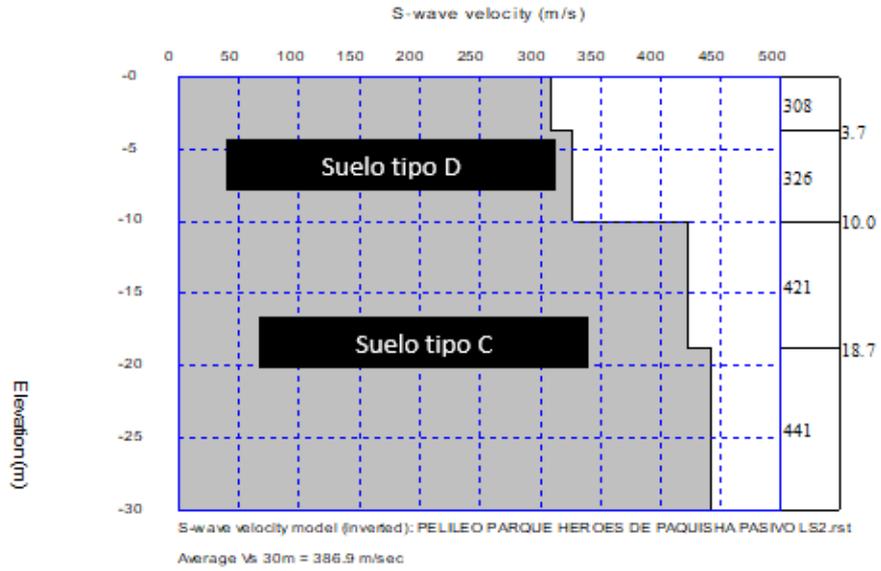


Figura 5.12 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2

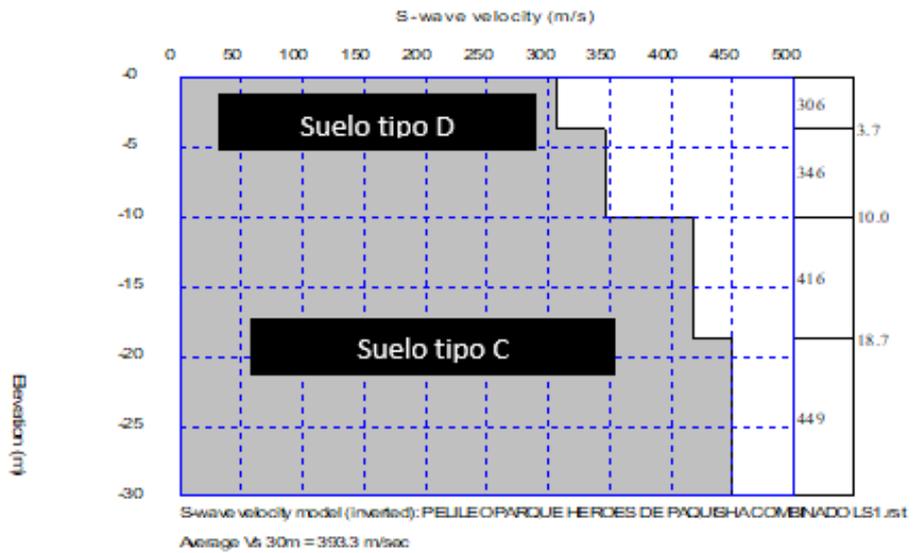


Figura 5.13 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS1

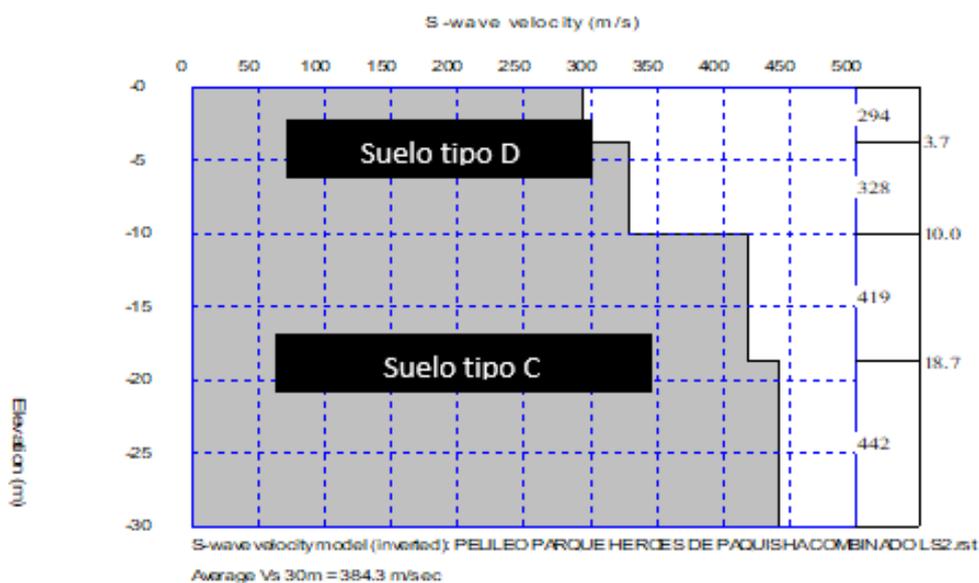


Figura 5.14 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P01 Parque héroes de Paquisha de la línea sísmica LS2

5.4.2. P2 Sector Mercado Mayorista (Sector Pelileo Viejo)

En la figura 5.15 se indica la ubicación vista en planta por medio de google earth de los geófonos, la tabla 5.4 se indican las coordenadas de las dos líneas sísmicas realizadas en el sector mercado mayorista.

Tabla 5.4

Coordenadas de las líneas sísmicas en P02 Sector Mercado Central

SITIO	LÍNEA SÍSMICA	GEÓFONO	COORDENADAS SUR	COORDENADAS ESTE
SECTOR MERCADO MAYORISTA	LS3	G1	9852777	774770
		G12	9852785	774830
	LS4	G1	9852828	774807
		G12	9852768	774824



Figura 5.15 Ubicación del sitio seleccionado para el estudio de sismica de refracción Sector Mercado Central

En las figuras 5.16 a la 5.21 se presentan los resultados de las dos líneas sísmicas de acuerdo al método activo, pasivo, y combinado.

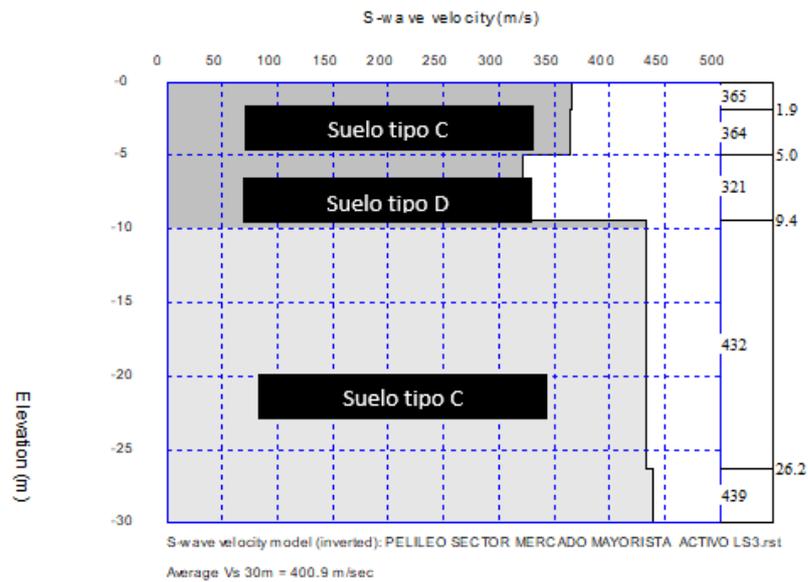


Figura 5.16 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3

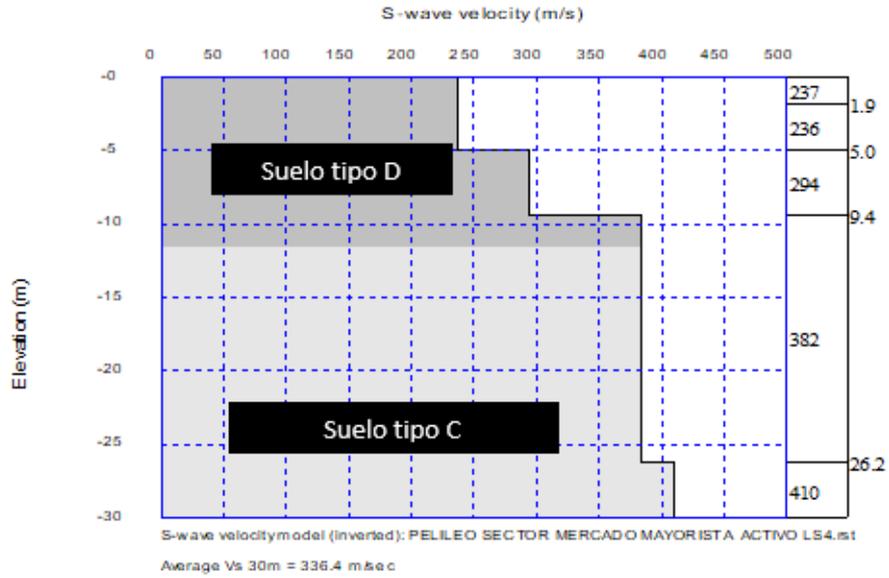


Figura 5.17 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método activo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4

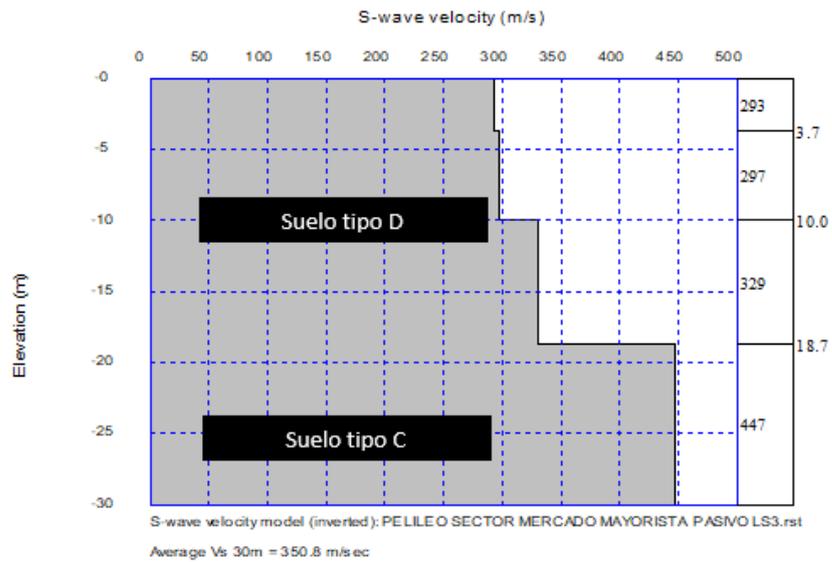


Figura 5.18 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3

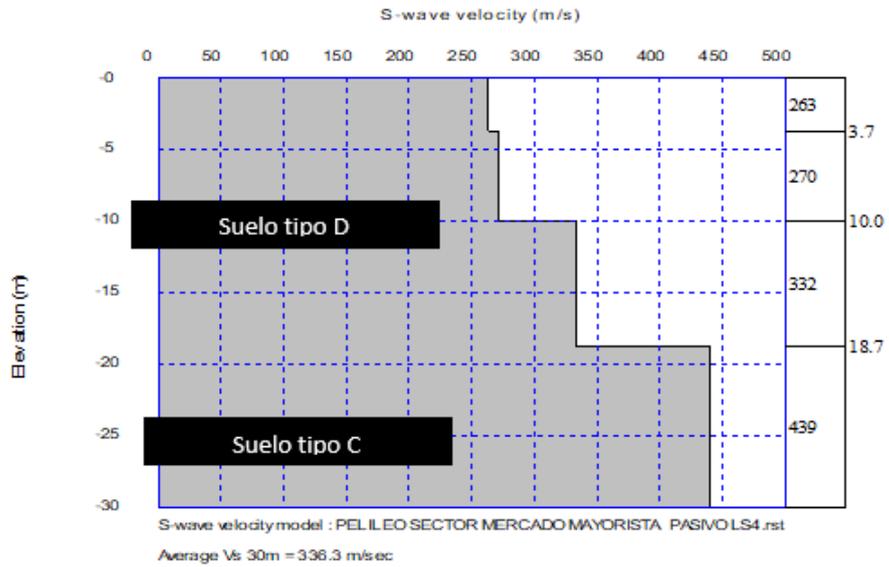


Figura 5.19 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método pasivo en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4

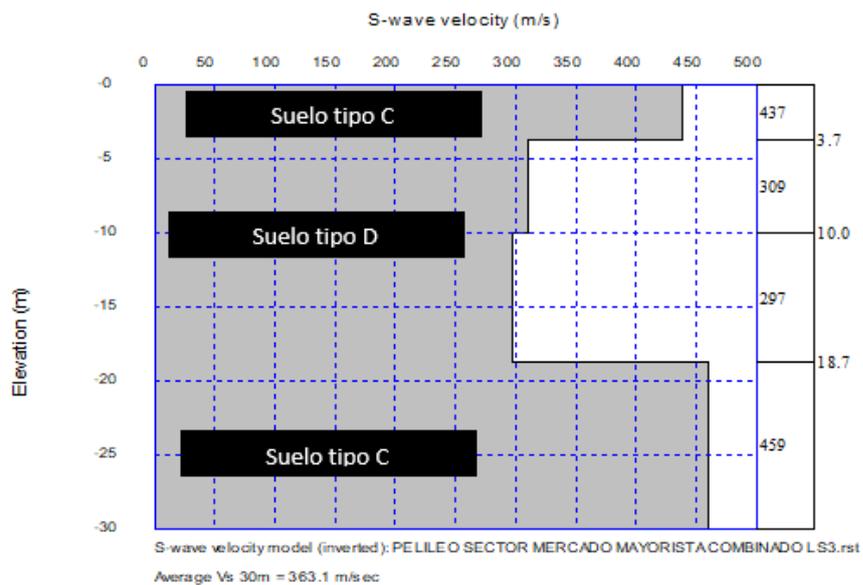


Figura 5.20 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS3

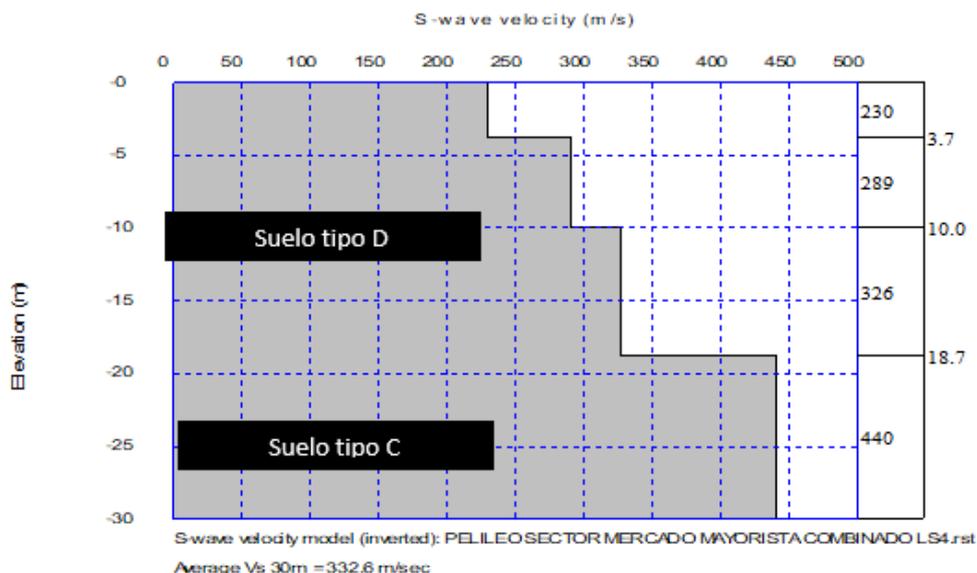


Figura 5.21 Resultados de la velocidad de onda de corte con el método combinado en P02 Sector mercado mayorista de la línea sísmica LS4

5.4.3. Correlación de perfiles sísmicos

Se ha encontrado la velocidad de la onda de corte en los 30 primeros metros Vs30, aplicando la ecuación dada en la sección 3.2.12; se ha encontrado la velocidad de onda de corte Vs30 en los métodos pasivos, activos y combinados tabla 5.5.

Tabla 5.5

Clasificación de perfil sísmico para Pelileo, de acuerdo al Vs30

SITIO	LÍNEA SÍSMICA	VS30 ACTIVO (m/s)	VS30 PASIVO (m/s)	VS30 COMBINADO (m/s)	CLASIFICACIÓN PERFIL GEOTÉCNICO
PARQUE	LS1	393.4	396.0	393.3	C
HEROES DE PAQUISHA	LS2	347.3	386.9	384.3	C
SECTOR	LS3	400.9	350.8	363.1	C
MERCADO MAYORISTA	LS4	336.4	336.3	332.6	D

5.5. Espectro de diseño. Desarrollo de gráficos NEC 2015

Para la elaboración de esta sección se toman en cuenta todos los parámetros que indica la NEC-15 descritos en el numeral 3.3. Se tomará en cuenta que, el resultado obtenido en el numeral 5.4.3., específicamente en la tabla 5.5, nos indica los tipos de perfil de suelo que se obtienen mediante las líneas sísmicas en los puntos LS1-LS2 parques héroes de Paquisha y LS3-LS4 sector mercado mayorista.

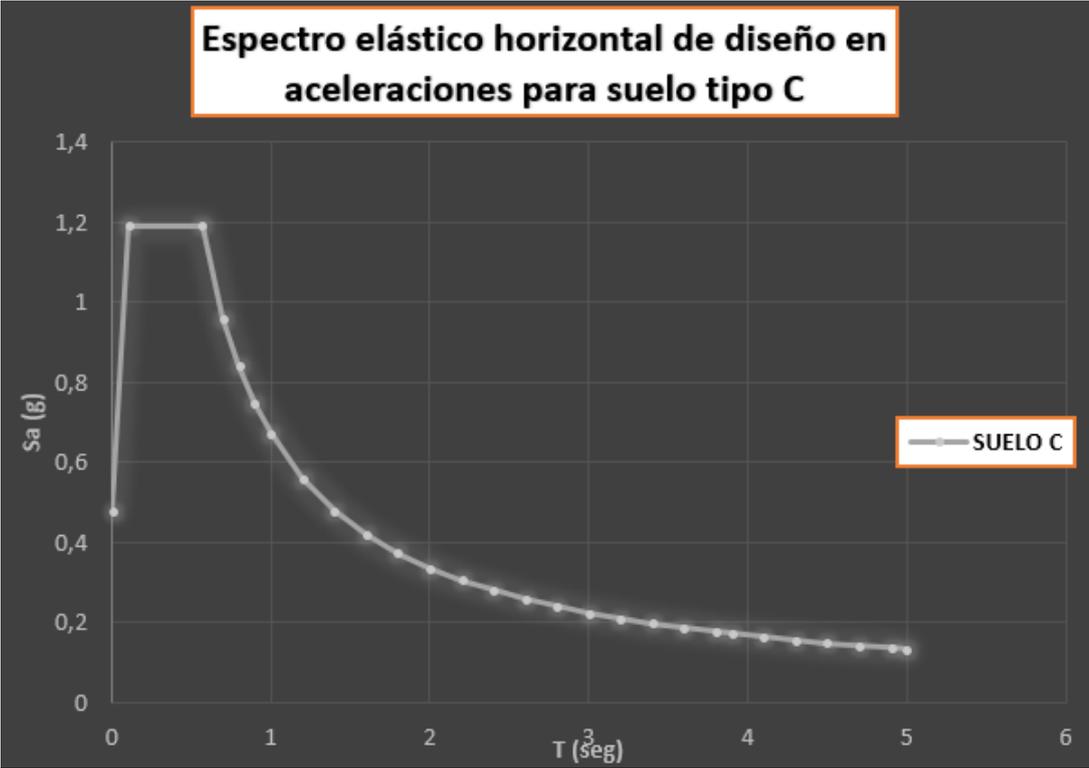


Figura 5.22 Espectro horizontal para suelo tipo C

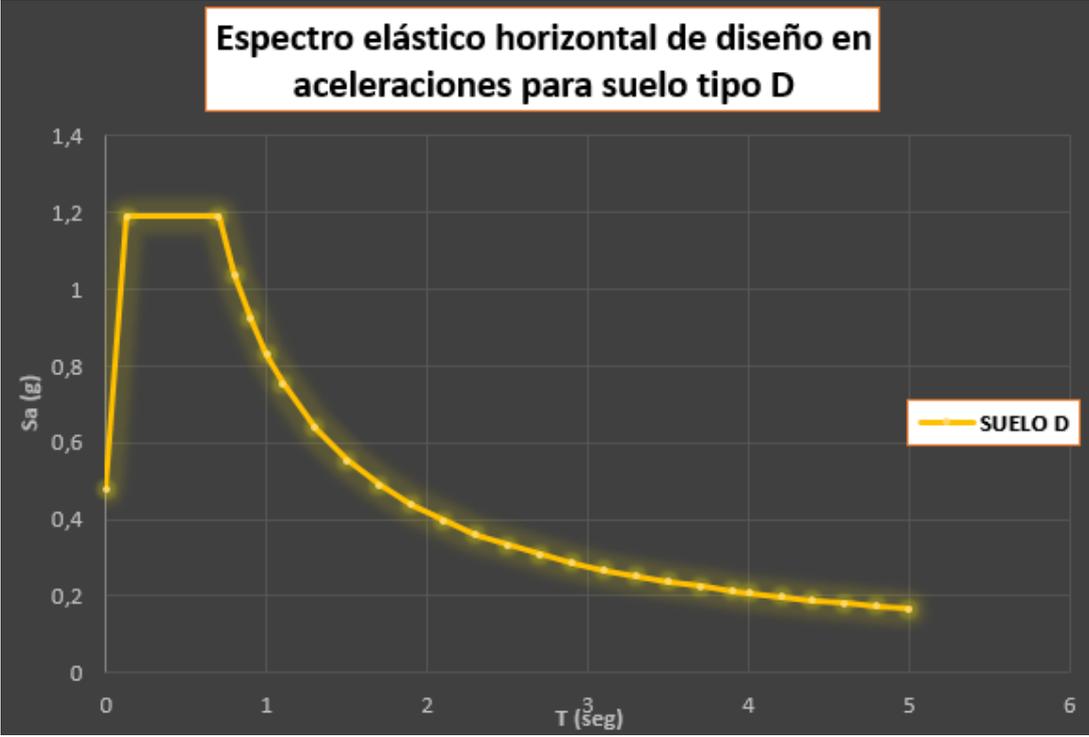


Figura 5.23 Espectro horizontal para suelo tipo D

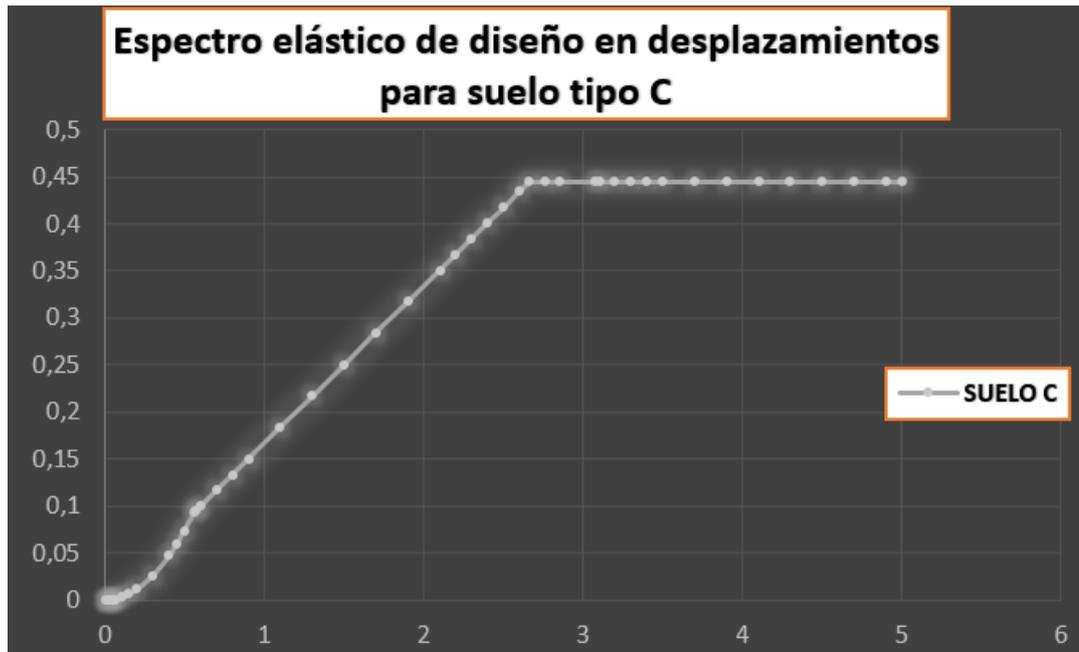


Figura 5.24 Espectro en desplazamiento para suelo tipo C

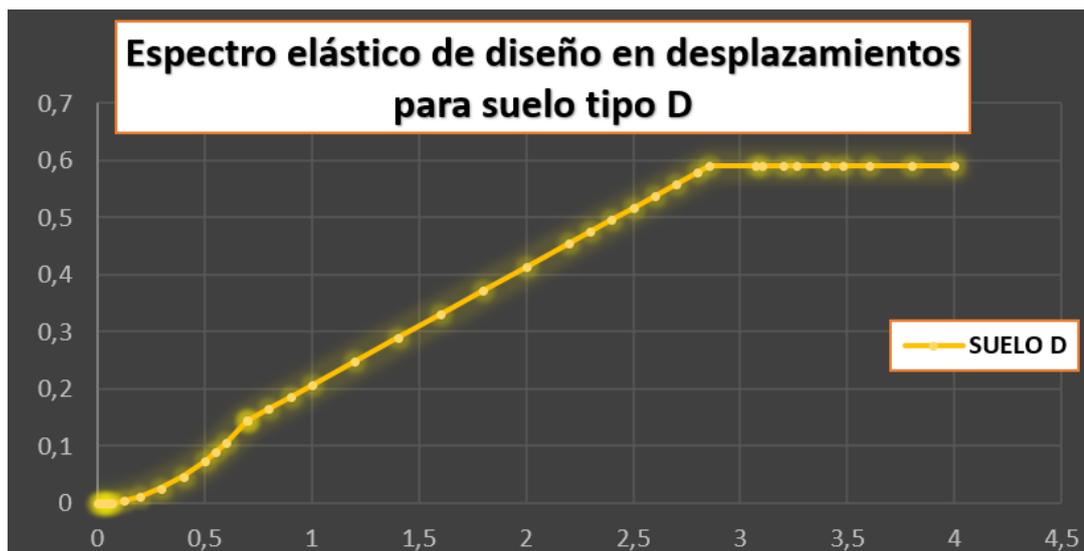


Figura 5.25 Espectro en desplazamiento para suelo tipo D

5.6. Susceptibilidad de fenómeno de licuefacción en el cantón Pelileo

De acuerdo con los siguientes parámetros y de las evidencias de los tipos de suelos que han sufrido el fenómeno de licuefacción (sector Mocha, Pelileo Viejo, terremoto de 1949), los suelos de Pelileo según la caracterización geotécnica en la mayoría de los estratos hasta una profundidad de 30 metros, se clasifican como tamaños granulométricos de arenas limosas, cuyo tipo de suelo volcánico corresponde

a suelos de cenizas y lahares, ubicada entre los antecedentes históricos de suelos licuables.

Pero según las condiciones que debe cumplir la ciudad de Pelileo de acuerdo a la susceptibilidad geológica e hidrogeológica, no se encontró antecedentes históricos de ocurrencia de la licuefacción a excepción del sector Mocha, ubicado fuera del área de viviendas de Pelileo Viejo, y debido a esa ocurrencia es muy probable, que el sitio Mocha sea caracterizado por una condición geomorfológica de represamiento. Datos de pruebas y análisis in situ que indican que es probable que los suelos se licúen y no cumple con la condición de nivel freático a suelos <13 m de profundidad, debido a que en las dos perforaciones realizadas hasta una profundidad de 30 metros no se encontró nivel freático.

De acuerdo a los parámetros que debe cumplir para que sea licuable a la susceptibilidad geotécnica, el grado de saturación de los suelos de Pelileo está entre 12% y 45% y de acuerdo al porcentaje de finos que debe tener el suelo para ser licuables, solo lo cumplen en algunos estratos, debido a que la mayoría de los estratos el contenido de fino es mayor que 35% (anexo 1 y 2).

Por otro lado, el comportamiento de plasticidad de las partículas de grano fino de los suelos es más importante que la fracción de tamaño de arcilla. Por lo tanto, mostraron que los suelos se consideran probablemente licuables cuando (LL) es inferior al 37% y (PL) es inferior al 12% (Seed et al. 2003; Bray y Sancio 2006; Idriss y Boulanger 2008). Estos requisitos si cumple los suelos de la ciudad de Pelileo de acuerdo a los resultados de los límites de Attenberg y las muestras de suelos obtenidas de las perforaciones, resultaron no plásticas obteniendo resultado en el límite líquido muy bajo.

En la tabla 5.6, se muestra los valores de índice de plasticidad que se obtuvo como resultado, es en la perforación P01 a una profundidad de 0 a 1,45 metros, de ahí hasta los 30 metros los resultados de límite líquido y límite plástico fueron no plástico. En la perforación P02 todos los valores fueron no plásticos.

Tabla 5.6
Valores de índice de plasticidad

PERFORACIÓN	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD
P01	25,11	23,21	1,90
P01	NP	NP	-
P02	NP	NP	-
P02	NP	NP	-

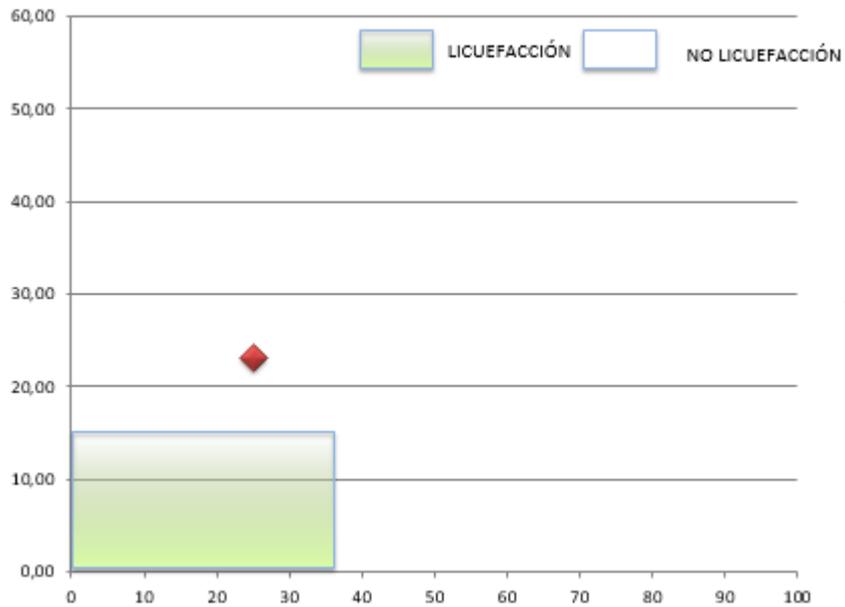


Figura 5.26 Relación límite líquido vs límite plástico

Siendo en el único punto P01 un resultado a los primeros metros un suelo no licuable. Las normas internacionales coinciden en la conclusión reflejada en el estudio de la presente tesis, de que, los suelos de la ciudad de pelileo no son licuables, y por lo tanto el riesgo por licuefacción es de bajo a muy bajo.

Como resultado del presente trabajo de grado, realizado por medio de los estudios de geotecnia y geología en el área urbana en pelileo, se obtienen los siguientes mapas de microzonificación sísmica que se adjuntan en las figuras 5.27 y 5.28.

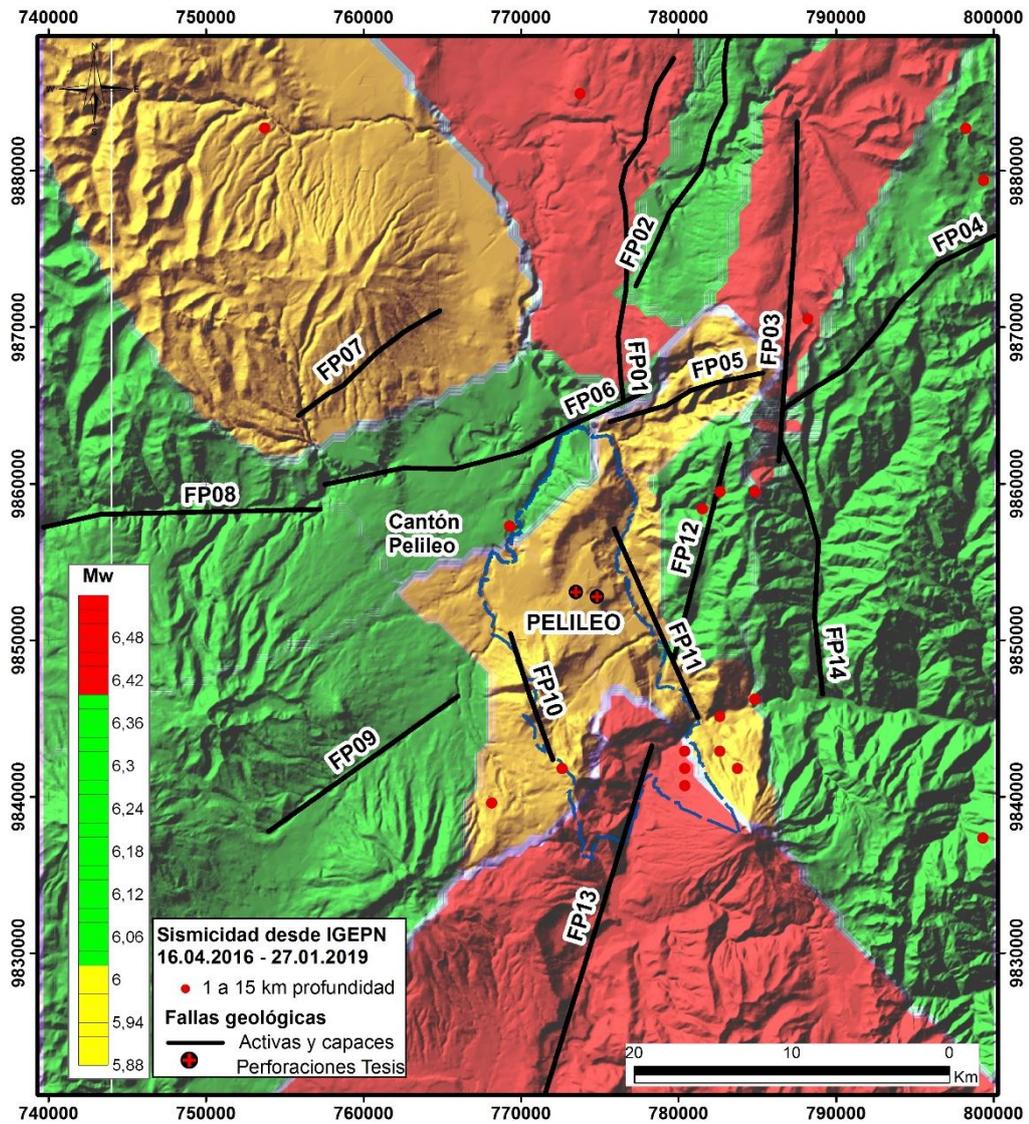


Figura 5.27 Mapa de Microzonificación sísmica del cantón Pelileo y sus niveles de Mw.

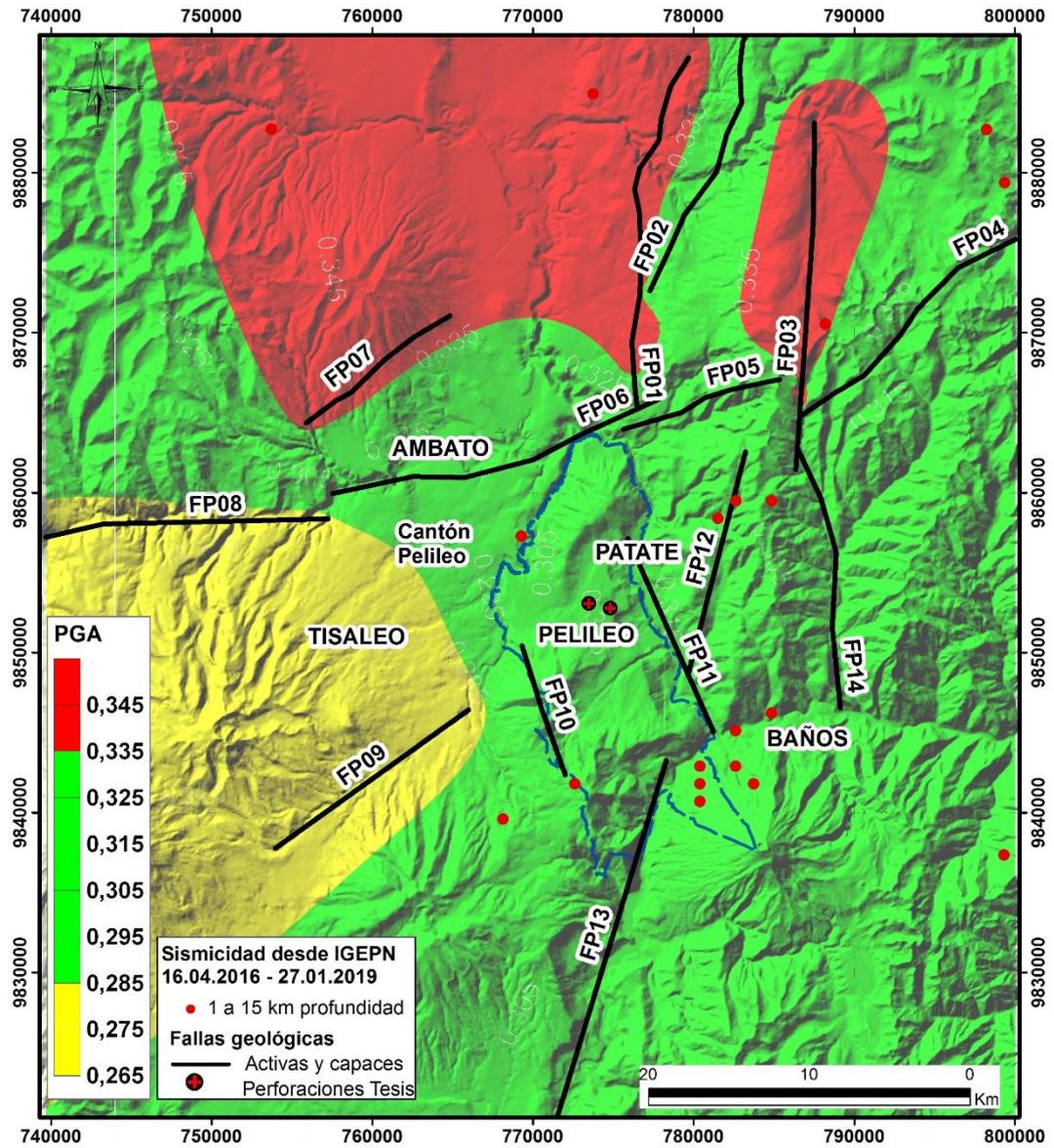


Figura 5.28 Mapa de Microzonificación sísmica del cantón Pelileo para propósito de diseño y valor de factor de zona con respecto a sus niveles de PGA

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Con las investigaciones realizadas para el desarrollo de la presente tesis se ha llegado a las siguientes conclusiones:

Luego de realizar el análisis de los resultados de los estudios de microzonificación sísmica y de acuerdo a las velocidades de ondas de corte en los primeros 30 metros (V_{s30}), y utilizando el euro código y la norma ecuatoriana de la construcción, se pudo obtener que los perfiles de suelos geotécnicos del cantón Pelileo comprende de tipo C y D respectivamente, donde se realizaron los ensayos geofísicos.

Después de observar los resultados obtenidos de los ensayos geomecánicos, de las muestras obtenidas de las perforaciones realizadas en la ciudad de Pelileo, se obtuvo dos perfiles estratigráficos muy homogéneos clasificados utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el perfil estratigráfico hasta una profundidad de 30 metros está comprendida en su mayor parte por tamaño de arena limosa, que litológicamente corresponde a suelos volcánicos de lahares.

Para caracterizar las fallas geológicas capaces de generar un sismo con afectación local, se determinó que la falla más próxima al poblado de Pelileo es la FP12, con una distancia sitio-falla de 2 km, pudiendo alcanzar magnitudes de $6.0 \leq M_w \leq 6.2$ con PGA 0.32 g, pero también cercanas al cantón se encuentra las fallas FP04-FP08, con niveles de peligrosidad alta (Tabla 5.1), y las fallas FP09-FP11-FP12, con niveles de peligrosidad moderada. La falla con mayor longitud de 26 km, es la FP13 con estimación de $6.5 \leq M_w \leq 6.8$ y PGA 0.31g, ubicada a 17 km de distancia del poblado de Pelileo. El mapa de zonación morfo-estructural (véase en figura 5.1) para la ciudad de Pelileo permite determinar las zonas de más alta peligrosidad sísmica, con el objetivo principal que, esta información sea utilizado para el diseño de estructuras sismo resistentes, permitiendo conocer con anticipación las probables áreas que se encuentran expuestas al riesgo sísmico.

De acuerdo a las condiciones del terreno y de la calidad del suelo de la ciudad de Pelileo se puede decir que en los puntos donde se realizaron los estudios los suelos de la ciudad cumplen algunas propiedades para que sea susceptible a licuefacción como es que el limite liquido (LL) inferior al 37% y el limite plástico (PL) es inferior

al 12%, además que los suelos de tamaño arena limosa (que litológicamente corresponde a suelos volcánicos de lahares), están entre los suelos que hay registros históricos que han sufrido el fenómeno de licuefacción en el sector Mocha.

6.2. RECOMENDACIONES

El cantón Pelileo tiene un rápido crecimiento de zonas urbanas, por lo que se requiere estudios más detallados para conocer el comportamiento geomecánico y perfiles geotécnicos de los suelos volcánicos. Para el presente estudio de tesis, se han empleado datos de dos estaciones de muestreos geotécnicos y sísmicos (datos proporcionados por la empresa Risk Safety y Municipio de Pelileo), sin embargo se recomienda realizar mayores estaciones de muestreos con un mallado entre 100 metros de distancia. Estudios de tomografía eléctrica que alcancen datos de 30 a 50 metros de profundidad es requerido para analizar posibles zonas de fracturamientos y niveles acuíferos posicionados por alguna estructura geológica que delimiten su acción de una potencial licuefacción de suelos.

Toda esta información geotécnica proporciona nuevos datos para considerar en los estudios de peligrosidad sísmica, en particular para generar espectros de control para componente vertical - horizontal y pseudo-aceleraciones, por lo que también se recomienda analizar las fallas geológicas con actividad sísmica moderada a alta, identificadas en este estudio de tesis.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R. (Primera Edición 2018). *Microzonificación Sísmica de Ambato*. Ambato: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Jaillard, E., Mothes, P., Jarrin, P., Cisneros, D. (2016). Partitioning of oblique convergence in the northern Andes subduction zone: migration history and present-day boundary of the North Andean Sliver in Ecuador.
- Ambraseys. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Eng StructDyn*. 1-105.
- Bedón, P. A. (2018). The “Mera” lahar deposit in the upper Amazon basin: Transformation of a late Pleistocene collapse at Huisla volcano, central Ecuador.
- Bonifaz. (2018). Estudios Geofísicos de la ciudad de Ambato para el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Ambato. *Risk & Safety Cia. Ltda*.
- Braja M, D. (2011). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. Cengage Learning.
- Bristow C.R., Hoffstetter R. (1977). *Lexique Stratigraphique, Amérique Latine*. Ed. CNRS, Paris, Fas. 5–2, Equateur: 410.
- Bustillos. (2008). Las avalanchas de escombros en el sector del volcán Tungurahua. *Tesis de Grado Inédita de Ingeniero Geólogo*. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8682>.
- Casagrande, A. (1932-1948). Classification and identification of soils. *American Society of Civil*.
- Champenois, J. B. (2017). Evidences of surface rupture associated with a low magnitude (Mw5.0) shallow earthquake in the Ecuadorian Andes.
- Champenois, J., Baize, s., Vallée, M., Jomard, H., Alvarado, A., Espin, P., Audin, L. (2017). Evidences of surface rupture associated with a low magnitude (Mw5.0) shallow earthquake in the Ecuadorian Andes.
- Chunga K., Ochoa-Cornejo F., Mulas M., Toulkeridis T., Menéndez E. (2019). Characterization of Seismogenic Crustal Faults in the Gulf of Guayaquil, Ecuador. *Andean Geology*, 46 (1): 66-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV46n1-2991>
- Chunga K. (2010). Shallow crustal earthquakes and seismic zonation for Ecuador through the integration of geological, seismological and morphostructural data. University of Insubria. Ph.D. Thesis, p. 165. (Italian version)
- Collahuazo, B., Arleth, A., Cruz, J., & Rober, D. (2017). *Generación de una herramienta informática en el software OpenSees permita modelar el efecto de licuefacción de suelos en zonas sísmicas*. Loja.
- Fernandez, L. a. (2000). The reference spectral noise ratio method to evaluate the seismic response of a site, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 381-388.
- Geometrics. (2005). Obtenido de <ftp://geom.geometrics.com/pub/seismic/SeisImager>
- IG, I. G. (2017). *ERUPCIÓN DE FEBRERO- MARZO DEL VOLCÁN TUNGURAHUA*. TUNGURAHUA.

- Leonard M., (2010), "Earthquake fault scaling: Self consistent relating of rupture length width, average displacement, and moment release", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100 (SA), 1971-1988p.
- Santamarina, G. A. (2015). CLASIFICACIÓN DE SUELOS: FUNDAMENTO FÍSICO, PRÁCTICAS ACTUALES Y RECOMENDACIONES. *ResearchGate*, 1-20.
- NEC. (2015). *Peligro Sísmico Diseño sísmo resistente*.
- Pelileo, G. d. (s.f.). Obtenido de <https://ugrpelileo.jimdo.com/mapa-de-riesgos/>
- Rajib Biswas, a. S. (2011). Site Response Estimation by Nakamura Method: Shillong City, Northeast India.
- Sandoval Gomez, V. H. (2013). Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos.
- Siddiqj, J. a. (2002). Ground motion amplification at rock sites across Canada as determined from the horizontal to vertical components ratio. 877-884.
- Stirling M., Goded T., Berryman K., Litchfield N. (2013). Selection of earthquake scaling relationships for seismic-hazard analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 6, pp. 2993-3011, doi: 10.1785/0120130052.
- Wesnousky (2008). Displacement and geometrical characteristics of earthquake surface ruptures: issues and implications for seismic-hazard analysis and the process of earthquake rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 98, No. 4, pp. 1609-1632, doi: 10.1785/0120070111.
- Varnes. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principal and practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. *Nat Hazards*.

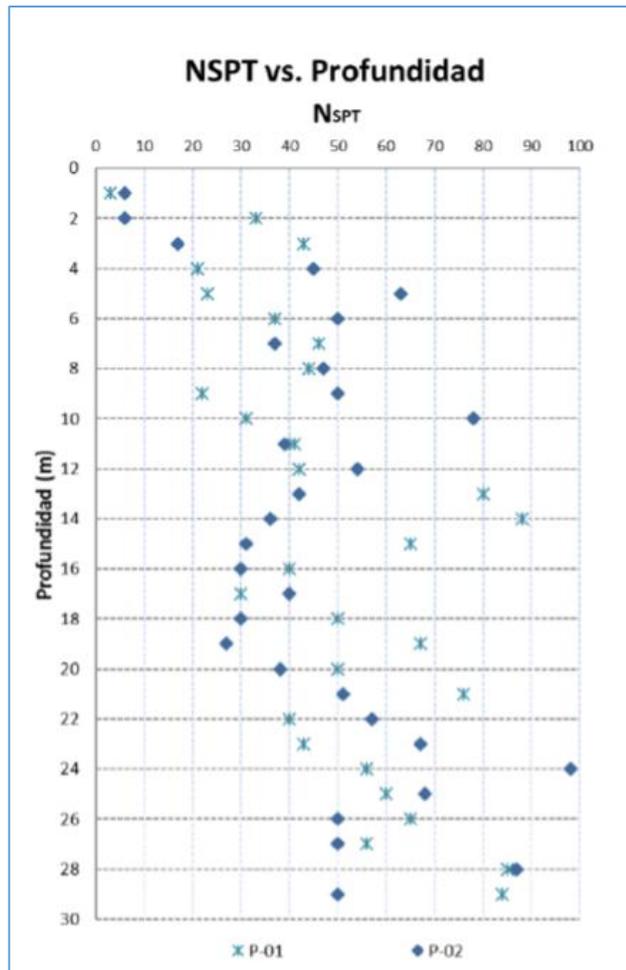
ANEXOS

SONDEO	PROF. (m)	W%	LL%	LP%	IP%	GRAVA (%)	ARENA (%)	FINO (%)	CLASIFICACIÓN
P-01	1,00 - 1,45	22,49	25,11	23,21	1,9	2	49	49	SM
	3,00 - 3,45	21,69	NP	NP	NP	0	49	51	ML
	8,00 - 8,45	19,03	NP	NP	NP	0	81	19	SM
	10,00- 10,45	23,1	NP	NP	NP	2	48	50	SM
	12,00- 12,45	25,83	NP	NP	NP	1	64	35	SM
	16,00- 16,45	32,3	NP	NP	NP	7	61	32	SM
	20,00- 20,42	16,12	NP	NP	NP	0	63	37	SM
	24,00- 24,45	41,67	NP	NP	NP	5	53	42	SM
	26,00- 26,45	25,58	NP	NP	NP	2	53	45	SM
	29,00- 29,45	24,53	NP	NP	NP	0	55	45	SM

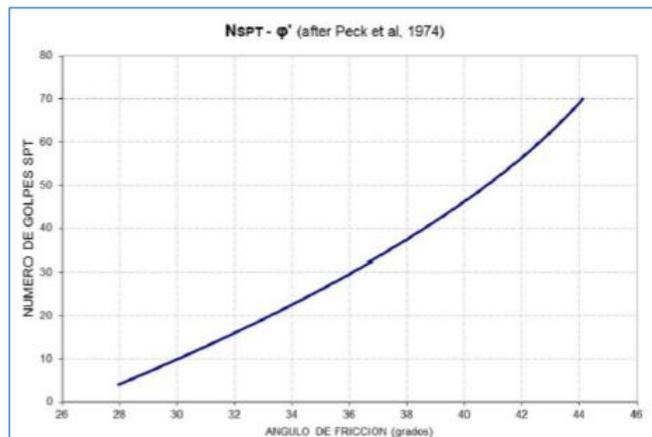
Anexo 1 Clasificación se los suelos de Pelileo P01, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

SONDEO	PROF. (m)	W%	LL%	LP%	IP%	GRAVA (%)	ARENA (%)	FINO (%)	CLASIFICACIÓN
P-02	1.00 - 1.45	12,61	NP	NP	NP	2	59	39	SM
	4,00 - 4,45	23,5	NP	NP	NP	1	48	51	ML
	5,00 - 5,45	18,25	NP	NP	NP	0	52	48	SM
	9,00 - 9,45	29,44	NP	NP	NP	2	58	40	SM
	11,00- 11,45	22,14	NP	NP	NP	1	57	42	SM
	13,00- 13,45	42,86	NP	NP	NP	1	58	41	SM
	18.00- 18.45	44,04	NP	NP	NP	4	48	48	SM
	20.00- 20.45	23,49	NP	NP	NP	1	47	52	ML
	23.00- 23.45	36,1	NP	NP	NP	12	55	33	SM
	26.00- 26.45	37,86	NP	NP	NP	3	65	32	SM

Anexo 2 Resumen de Resultados obtenidos en la perforación P02 de acuerdo a la SUCS en el cantón Pelileo

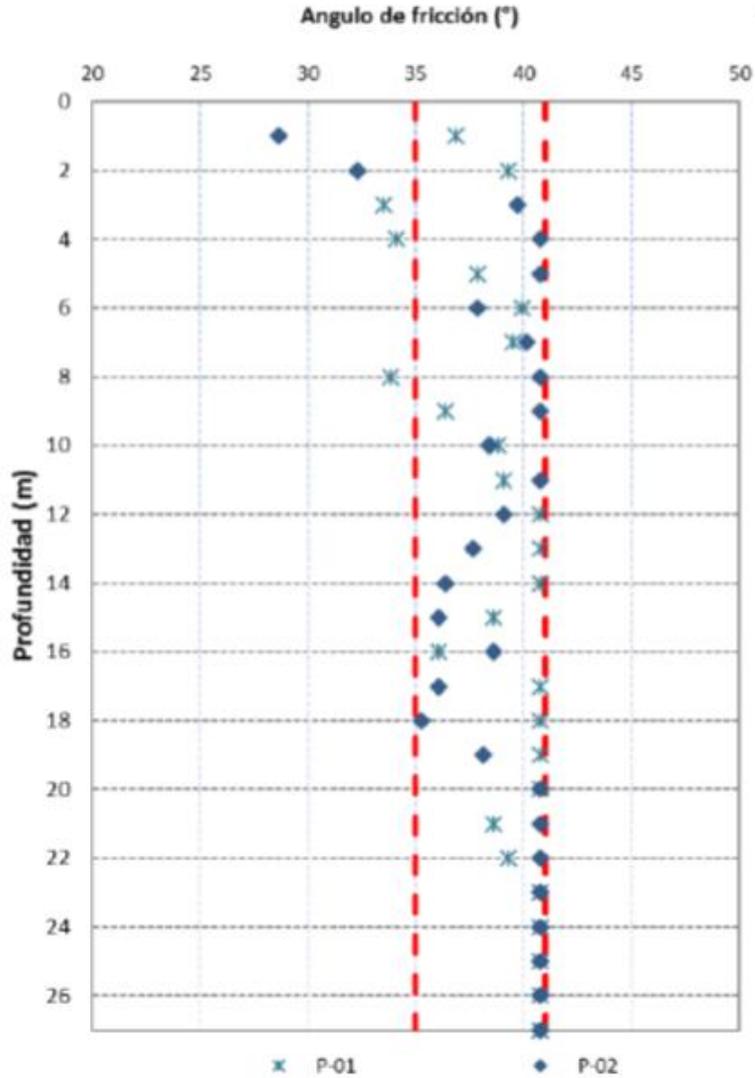


Anexo 3 NSPT vs Profundidad



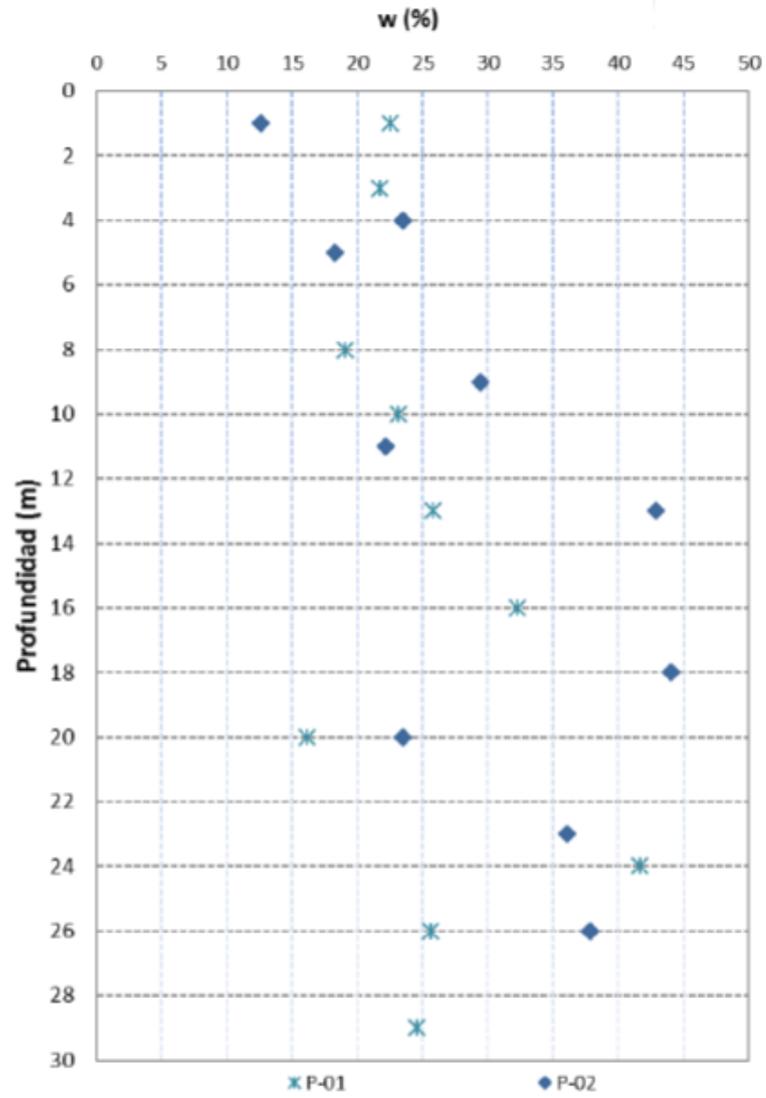
Anexo 4 Relación NSPT y ángulo de fricción

Ángulo de fricción vs. Profundidad



Anexo 5 Ángulo de fricción vs Profundidad

Contenido Humedad vs. Profundidad



Anexo 6 Contenido de humedad vs Profundidad