



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Tierra
Sólida - SCTS



PROGRAMA PRESUPUESTAL N°068: REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS POR DESASTRES

Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA CIUDAD DE AREQUIPA - CERCADO

(Comportamiento Dinámico del suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú
2014

ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE AREQUIPA - CERCADO

Provincia de Arequipa – Departamento de Arequipa

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gomez

Personal participante

Fabiola Rosado

Wilfredo Sulla

Javier Oyola

Martha Añazco

Gabriela Pérez

Jesús Huarachi

Henry Salas

Renzo Bustamante

Mariana Vivanco

Segundo Ortiz

Roberth Carrillo

Cristhian Chiroque

Abraham gamonal

Julio Martínez

José Guzman

Apoyo Técnico

Estela Torres

Augusto Cárdenas

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del Programa Presupuestal por Resultados N°068: Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres se ejecutó el proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica”, el mismo que tuvo como una de sus actividades la “Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico” obteniéndose como resultado final, la Zonificación Sísmica - Geotécnica de la ciudad de Arequipa, distrito Centro, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Arequipa han permitido identificar la existencia de dos tipos de suelos codificados como Tipo S1 y Tipo S2, y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030) corresponden a las ZONAS I y II.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Arequipa se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.- Aspectos Climáticos

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios Sismológicos

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

7.3.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.4.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Origen Depositional

9.1.1.2.- Origen Aluvial

9.1.1.3.- Origen Fluvial

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

11.3.- Periodos Dominantes

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Fichas de Calicatas

ANEXO 2: Fichas de Ensayo de Densidades

ANEXO 3: Fichas de Ensayo de Penetración Dinámica Ligera

ANEXO 4: Fichas de Posteo

ANEXO 5: Mapas formato A3

NOTA: La base de datos de campo, la información procesada y material fotográfico puede ser solicitado a la Dirección de Sismología del Instituto Geofísico del Perú. Contacto, Dr. H. Tavera (hernando.tavera@igp.gob.pe)

1.- INTRODUCCIÓN

Dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “**Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres**”, el Instituto Geofísico del Perú ejecutó durante el año 2014 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrolla la Actividad “**Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las siguientes ciudades:

- Ciudad de **Acarí**, distrito de Acarí, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Bella Unión**, distrito de Bella Unión, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Yauca**, distrito de Yauca, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Chala**, distrito de Chala, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Camaná**, distrito de Camaná, provincia de Camaná, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Arequipa**, distrito Centro, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Cocachacra**, distrito de Cocachacra, provincia de Islay, departamento de Arequipa.
- Ciudad de **Punta de Bombón**, distrito de Punta de Bombón, provincia de Islay, departamento de Arequipa.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región sur ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en cada ciudad y/o área urbana de la región (Silgado, 1978). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del

sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones.

Los estudios de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) permitirán tener mayor conocimiento sobre las características dinámicas del suelo sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

a.) **Buenos Planos.** Los planos de construcción deben ser hechos por profesionales con pleno conocimiento de las características dinámicas del suelo descritas en los Mapas de Zonificación Sísmica – Geotécnica.

b.) **Buenos Profesionales.** Para la construcción de las viviendas y/o obras de ingeniería se debe contar siempre con la supervisión de ingenieros civiles, arquitectos, etc.

c.) **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras fueron correctamente construidas.

Finalmente, remarcar que el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica permite conocer las características dinámicas del suelo y se constituye como información primaria a ser utilizada por los ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de las estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, debe considerarse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

2.- OBJETIVOS

El principal objetivo a cumplir en este estudio es obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para la ciudad de Arequipa - Cercado, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1: Plaza de Armas de la Ciudad de Arequipa

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Arequipa es la capital y mayor ciudad del Departamento de Arequipa (Figura 2), es la sede del Tribunal Constitucional y la «Capital Jurídica del Perú», también conocida como la «Ciudad Blanca». Arequipa es la segunda ciudad más poblada del Perú después de Lima, alcanzando el año 2014 los 869,351 habitantes según proyecciones del INEI. La ciudad de Arequipa se constituye como un importante centro industrial y comercial del Perú y gracias a su notable actividad industrial, es catalogada como la segunda ciudad más industrializada del país. Dentro de su actividad industrial destacan los productos manufacturados y la producción textil de lana de camélidos con calidad de exportación; por lo que, la ciudad mantiene estrechos vínculos comerciales con Chile, Bolivia y Brasil; vínculos con las ciudades conectadas por medio del Ferrocarril del Sur, así como con el puerto de Matarani.

La ciudad de Arequipa fue fundada el 15 de agosto de 1540, bajo la denominación de «Villa Hermosa de Nuestra Señora de la Asunta» en nombre del marqués don Francisco Pizarro y el 22 de setiembre de 1541, el monarca Carlos V en Cédula Real ordena que se la llame «Ciudad de Arequipa». La ciudad en el periodo virreinal adquirió importancia por su sobresaliente papel económico, y se caracteriza por el fidelismo hacia la Corona Española, recibiendo títulos como «Muy Noble y Muy Leal» y el de «Fidelísima».

En la historia republicana del Perú la ciudad adquiere mayor protagonismo en el campo político, siendo foco de rebeliones populares, cívicas y democráticas, y ha sido también cuna de sobresalientes figuras intelectuales, políticas y religiosas del país. En la época republicana se le otorga el título de «Heroica ciudad de los libres de Arequipa». Su casco histórico se extiende sobre una superficie de 332 hectáreas y fue declarado por la Unesco como «Patrimonio Cultural de la Humanidad», el patrimonio histórico y monumental que alberga y sus diversos espacios escénicos y culturales la convierten en una ciudad receptora de turismo nacional e internacional. En su casco histórico destaca la arquitectura religiosa virreinal y republicana producto de mezcla de características europeas y autóctonas, que constituyeron una propia escuela estilística denominada «Escuela arequipeña» de crucial importancia en toda la región y cuya influencia llegó hasta Potosí (Bolivia).

El distrito de Arequipa – Cercado limita por el norte con los distritos de Yanahuara y Alto Selva Alegre, al este con los distritos de Miraflores y Mariano Melgar, al sur con los distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero y Jacob Hunter y al oeste con el distrito de Sachaca.

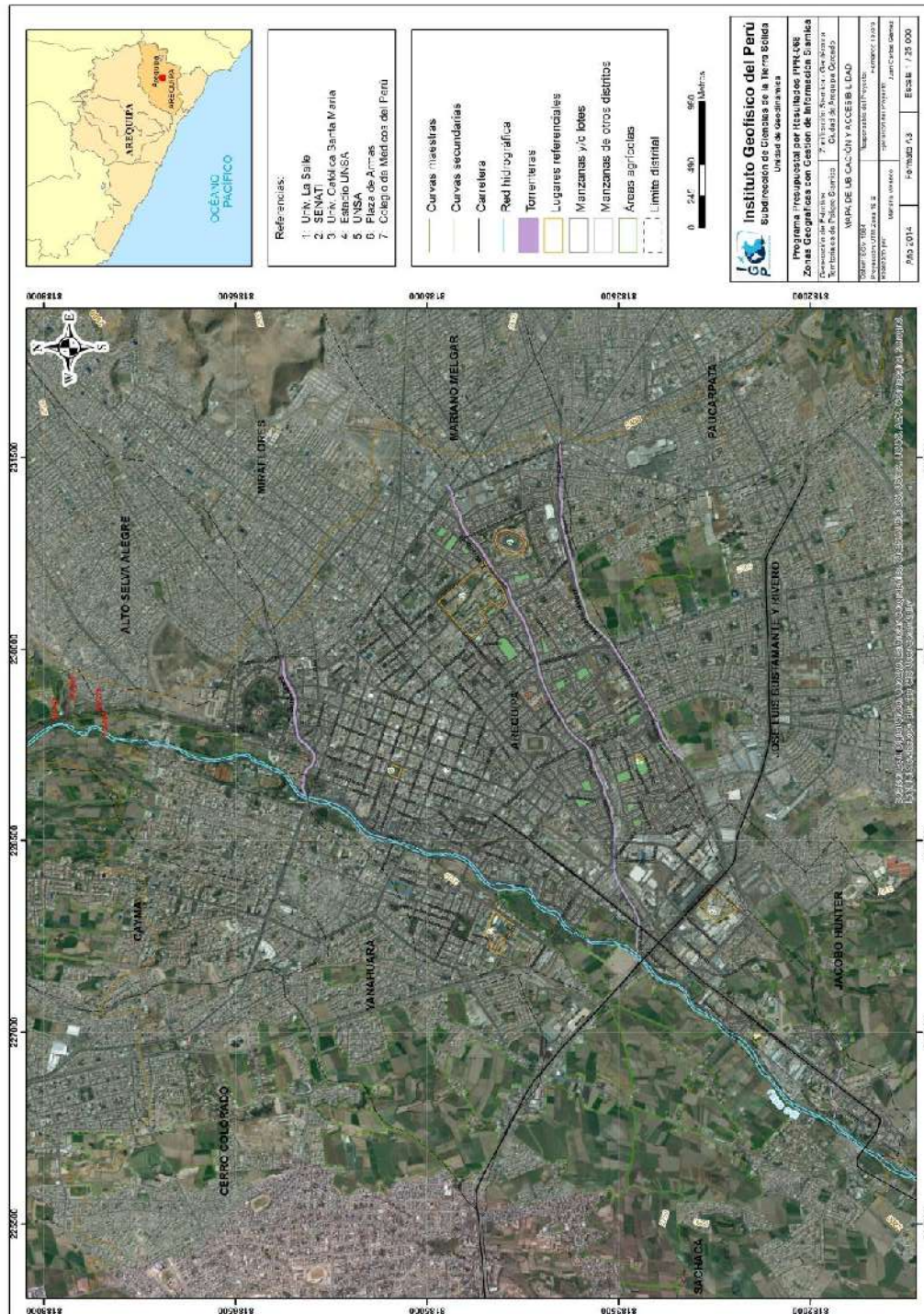


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Arequipa, distrito Centro, provincia de Arequipa, departamento de Arequipa.

3.1.- Aspectos climáticos

Para conocer los aspectos climáticos de la ciudad de Arequipa – Cercado, se ha tomado datos de temperatura y precipitaciones de la estación meteorológica La Pampilla para el periodo 2009 al 2014 (SENAMHI). Esta estación se encuentra a 2 km al noreste de la Plaza de Armas de la ciudad de Arequipa.

La temperatura máxima registrada en la ciudad de Arequipa – Cercado es de 25°C y la mínima de 5°C (Tabla 1). Las precipitaciones pluviales se dan entre los meses de diciembre a abril, siendo la máxima registrada en febrero del 2013 con 185 mm y la mínima de 0.2 mm en abril del año 2014, Tabla 2.

Tabla 1: Datos de temperatura de la estación meteorológica La Pampilla.

TEMPERATURA °C												
AÑO / MES	2009		2010		2011		2012		2013		2014	
	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
ENERO	SD	SD	23.6	11.05	21.07	10.12	21.04	10.48	23.32	11.35	22.1	10.81
FEBRERO	SD	SD	24.13	12.88	20.09	11.39	19.57	10.92	22.3	10.59	22.92	9.06
MARZO	SD	SD	23.92	11.04	21.46	9.4	22.25	10.4	22.84	9.12	22.24	9.52
ABRIL	SD	SD	23.72	10.12	21.85	9.14	21.64	9.43	23.69	6.22	23.5	9.43
MAYO	SD	SD	22.9	8.4	23.17	7.97	22.87	6.5	22.9	6.43	22.69	6.42
JUNIO	SD	SD	22.63	7.47	22.47	6.88	22.49	5.71	23.43	6.48	23.48	6.4
JULIO	22.78	7.3	22.16	5.4	22.06	6.62	23	5.91	22.97	7.01	SD	SD
AGOSTO	23.5	6.32	23.15	7.6	22.73	7.23	23.89	6.47	23.16	6.53	SD	SD
SEPTIEMBRE	24.28	8.57	22.82	7.66	23.35	8.38	24.06	8.65	23.89	7.09	SD	SD
OCTUBRE	24.01	8.71	22.72	7.71	22.3	6.78	23.46	8.08	23.82	8.04	SD	SD
NOVIEMBRE	23.81	10.01	21.95	7.04	22.91	8.68	23.37	8.28	22.83	7.62	SD	SD
DICIEMBRE	23.29	10.07	21.38	9.5	22.14	9.77	22.39	10.35	22.74	9.92	SD	SD

Tabla 2: Máxima y mínima precipitación registrada en el periodo 2009 – 2014.

PRECIPITACIONES (mm)												
AÑO / MES	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2009	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	S.D	0
2010	1.9	12.1	1.2	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0.9
2011	39.7	74.4	1	5.3	0.2	0	0	0	0	0	0	16.8
2012	98.5	153.8	31.3	19.3	0	0	0	0	0	0.3	0	2.1
2013	32.8	186	30.7	0	2.8	0.8	0	0	0	0	0	3.1
2014	33.3	0	2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	S.D

4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y que de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Silgado, 1978; Dorbath et al, 1990; Tavera y Buforn, 2001).

Por otro lado, a partir de los años 80, muchas de las ciudades costeras han soportado procesos continuos de migración de población proveniente de las provincias del interior del país y, debido a la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, la población inmigrante ha ocupado zonas de alto riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis, deslizamientos y otros efectos secundarios. A estas condiciones, se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables sin medir su vulnerabilidad e incrementando el riesgo en dichas zonas.

Considerando que el causante directo de los daños que producen los sismos en las ciudades, es la calidad de los suelos sobre el cual se encuentran las viviendas y otras obras de ingeniería, en el año 2005, la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora en la Gestión de Riesgos de Lima Metropolitana con el estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 Distritos de Lima y Callao (Microzonificación Sísmica), el mismo que se constituyó como información primaria y de base para cualquier otra investigación orientada a la gestión de riesgos (Figura 3). Como parte de este esfuerzo, el Instituto Geofísico del Perú, realiza estudios similares en los Distritos de Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino, permitiendo completar la información para el total de los distritos que conforman el área de la ciudad de Lima Metropolitana.

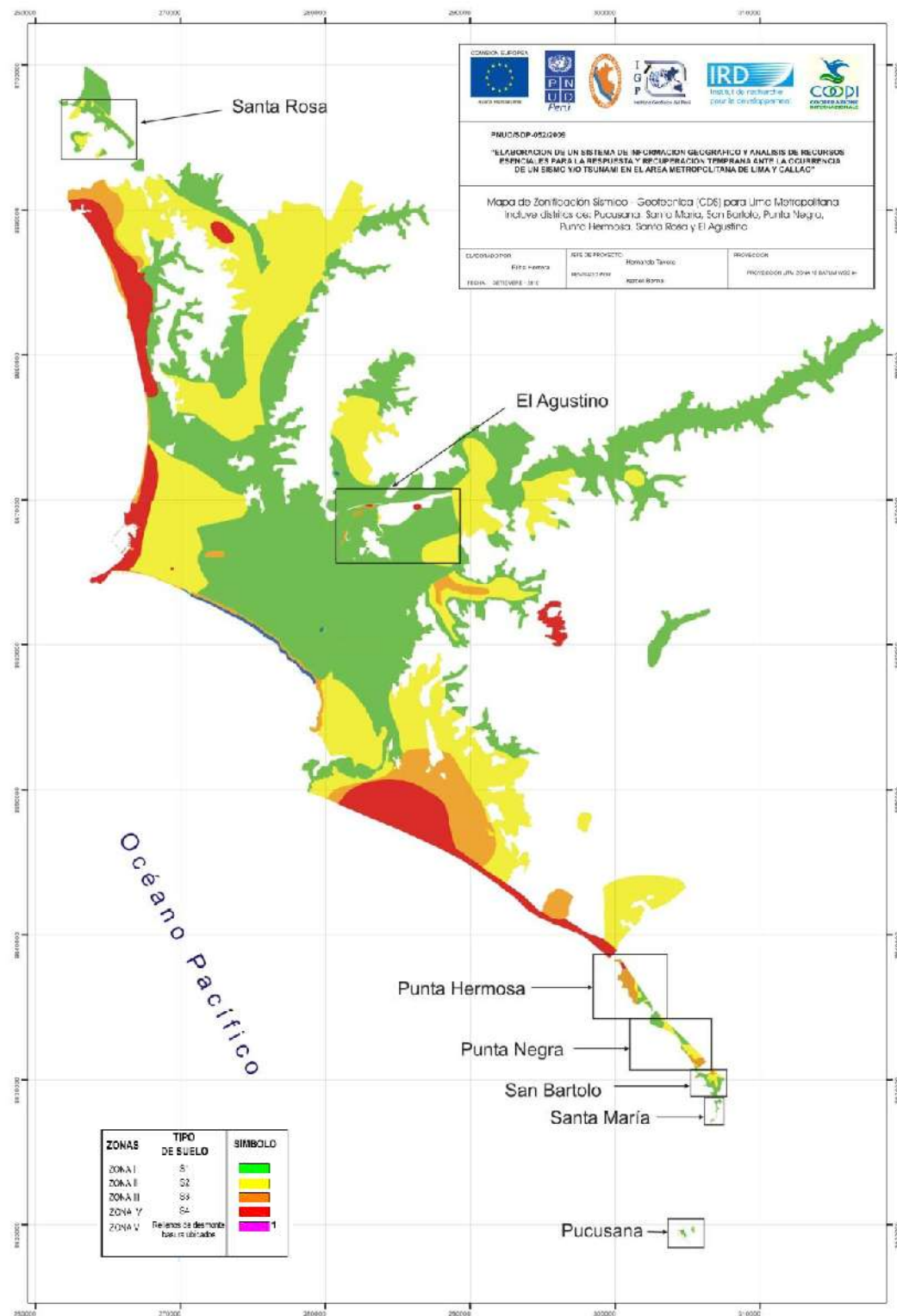


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica para las áreas urbanas de Chosica, Chaclacayo, Huaycán y Carapongo, todos ubicados en el departamento de Lima. En el año 2013, los estudios son realizados en las ciudades de Chimbote y Huarmey del departamento de Ancash; además de Barranca y Huacho del departamento de Lima.

En el año 2014, el IGP realiza estudios similares en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca, Chala, Camaná, Arequipa, Punta de Bombón y Cocahacra, todas ubicadas en el departamento de Arequipa. ***Los resultados obtenidos para la Ciudad de Acarí son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Arequipa”.***

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio, son uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos. Este factor es fuertemente dependiente de las características geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de los suelos. En conjunto, estos factores controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en la superficie después de ocurrido un evento sísmico.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado es considerado como una de las herramientas disponibles más importantes para minimizar los daños producidos por los sismos. La finalidad es evaluar el **comportamiento dinámico de los suelos** (CDS) teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas. Diversos estudios muestran, que los suelos ante la incidencia de ondas sísmicas asociadas a movimientos débiles y/o fuertes, responden de acuerdo a sus condiciones locales, pudiendo estos modificar el contenido frecuencial de las ondas y/o generar amplificaciones de las ondas sísmicas (Hartzell, 1992; Beresnev et al., 1995; Bard 1995; Lermo y Chávez-García, 1993, 1994 a,b; Bard y Sesame, 2001; Bernal, 2002).

Las metodologías a seguir para lograr el mayor conocimiento sobre el comportamiento dinámico del suelo o efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad, consideran los estudios geológicos, geomorfológicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos. Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica sobre las observaciones de campo y la toma de data in situ, para lo cual es necesario disponer de mapas catastrales actualizados de las zonas en estudio, así como los correspondientes a las zonas de futura expansión urbana.

En conclusión, los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas, permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico. El resultado final es el Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica que debe constituirse como el documento más importante en las tareas y programas de gestión del riesgo ante la ocurrencia de sismos.

Estudios complementarios, dependiendo de cada área de estudio, son los relacionados a tsunamis, inundaciones por crecida de los ríos, licuación de suelos y deslizamientos de tierra y piedras en zonas de pendiente. Estos escenarios son frecuentes en ciudades ubicadas en zonas costeras y otras en las regiones andinas y subandinas, próximos a zonas de alta pendiente y/o entorno a las riberas de ríos.

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

En Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar las indicaciones contenidas en el Reglamento Nacional de Construcción o “Norma E-030, Diseño Sismorresistente (2003)”. Básicamente, esta norma considera la clasificación de los suelos en función de sus propiedades mecánicas, espesor de estrato, período fundamental de vibración y velocidad de propagación de las ondas de corte (V_s). La Norma E-030, establece que los suelos pueden ser clasificados en cuatro tipos:

*.- **Suelos duros (Tipo S1).** Corresponden a suelos en los cuales la velocidad de propagación de la onda de corte varía entre 750 y 1500 m/s.*

*.- **Suelos intermedios (Tipo S2).** Suelos con características intermedias entre las indicadas para los suelos S_1 y S_3 .*

*.- **Suelos flexibles o con estratos de gran espesor (Tipo S3).** Corresponden a suelos que presentan velocidades de ondas de corte menor e igual a 180 m/s.*

*.- **Condiciones excepcionales (Tipo S4).** A este tipo corresponden los suelos excepcionalmente flexibles y los sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables.*

En general, para cualquier estudio se deberá considerar el tipo de suelo que mejor describa las condiciones locales de cada zona de interés. Para este estudio, la Zonificación Sísmica – Geotécnica se realiza en función de las características mecánicas y dinámicas de los suelos que conforman el terreno de cimentación del área de estudio y de las consideraciones dadas por la Norma 3-030 Diseño Sismorresistente). En tal sentido se establece la existencia de 5 zonas cuyas características son:

ZONA I: Zona conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene comportamiento rígido con periodos de vibración

natural determinados por las mediciones de microtrepidaciones (registros de vibración ambiental) que varían entre 0.1 y 0.3 s. Corresponden a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 500 y 1500 m/s.

ZONA II: En la zona se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) varía entre 180 y 500 m/s.

ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.5 y 0.8 s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (V_s) son menores a 180 m/s.

ZONA IV: Zona conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Los periodos predominantes para estos suelos son mayores que 0.7 s; por lo que, su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

ZONA V: Zona constituida por áreas puntuales conformadas por depósitos de rellenos sueltos correspondientes a desmontes heterogéneos que han sido colocados en depresiones naturales o excavaciones realizadas en el pasado con espesores entre 5 y 15 m. En esta zona se incluye también a los rellenos sanitarios que en el pasado se encontraban fuera del área urbana y que, en la actualidad, han sido urbanizados. El comportamiento dinámico de estos rellenos es incierto por lo que requieren de estudios específicos.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos en las viviendas o de grandes obras de ingeniería. Se debe buscar que el periodo fundamental de respuesta de la

estructura no coincida con la del suelo a fin de evitar el fenómeno de resonancia y/o una doble amplificación sísmica.

El periodo fundamental de las estructuras puede ser deducido de la fórmula propuesta por Rodríguez y Aristizabal (1998), donde $T = N/\lambda$ (T , Periodo de la estructura; N =Número de niveles en la edificación y λ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de λ es igual a 10 y el periodo dominante para una determinada estructura puede ser estimada con solo conocer el número de pisos de cada vivienda. Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

7.- METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Arequipa - Cercado se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Sismicidad

Se hace uso del Mapa Sísmico del Perú (Tavera, 2014) para describir las características sísmicas de la región en donde se encuentra el área de estudio. Del mismo modo, se describe a los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en la región a fin de describir los daños producidos por estos eventos durante el periodo histórico e instrumental. Para este objetivo se analiza la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990), así como la proporcionada en los reportes técnicos elaborados por la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del IGP.

7.2 Estudios de Peligro Sísmico

Considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida el área en un determinado periodo de tiempo. Para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2012), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007).

7.3.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo, de información geológica, geomorfológica, geodinámica y de zonas susceptibles a deslizamientos y/o flujos. El objetivo es identificar y conocer las características geológicas de los suelos en la ciudad de Punta de Bombón y alrededores.

.- **Levantamiento Geológico y Geomorfológico.** Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características

geológicas y geomorfológicas de carácter local, considerando bases de datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.

.- **Análisis Geodinámico:** Considera la evaluación de los diversos procesos de intemperismo y meteorización que conducen a movimientos en masa, así como el inventario de los mismos teniendo en cuenta parámetros intrínsecos como la litología, pendientes, geomorfología, cobertura vegetal y drenaje. Asimismo, se realiza el análisis de los niveles de inundación por situaciones de crecida de ríos en épocas de lluvias intensas.

.- **Análisis Geotécnico:** La geotecnia se encarga del estudio de las propiedades físicas y del comportamiento de los suelos y rocas, y para ello se aplican técnicas de exploración y geotécnica como calicatas, perforaciones, ensayos de mecánica de rocas, etc. Estos estudios se realizan con la finalidad de elaborar el diseño de cimentaciones para estructuras tales como viviendas, edificios, puentes, carreteras, taludes, presas, etc. También permite identificar y solucionar problemas de asentamientos, licuación, expansividad y agresividad, entre otros.

En este estudio, la recolección de datos para los estudios geotécnicos se realiza mediante calicatas, ensayos de densidad de campo, muestreos con posteadora y ensayos de penetración ligera (DPL). Las características de estos métodos son (ver Anexos):

.- **Exploraciones a cielo abierto** (Norma ASTM D420): Conocidas como calicatas y consiste en realizar excavaciones de profundidad superficial (hasta 3 metros) con ayuda de una retroexcavadora. En general las dimensiones son de 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m. El objetivo es extraer muestras de suelo para realizar análisis dos tipos de análisis, el primero considera se realiza los análisis granulométricos, límites de elasticidad y contenido de humedad para conocer la clasificación de los suelos de acuerdo al Código SUCS. La segunda muestra se utiliza para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es

posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante.

.- **Densidad de Suelo in situ** (Norma ASTM D1556): Consiste en evaluar la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo. Para tal objetivo se realiza el ensayo de densidad de campo con el uso del método del cono, el cual permite conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación permite conocer la compactación de las partículas que conforman el suelo, más compactos indica mayor resistencia a la deformación.

.- **Exploraciones con Posteadora Manual** (Norma ASTM D1452): Se define como posteadora a un barrenador manual en forma de “T” que permite realizar sondeos exploratorios (perforaciones) en suelos blandos (arcillas y arenas) hasta una profundidad de 6 metros, procedimiento que permite obtener muestras de suelo. Aunque estas muestras son trituradas, sirven para conocer el tipo de suelo y el contenido de humedad. La técnica no es útil en suelos compuestos por gravas y gravillas.

.- **Ensayo de Penetración Dinámica Ligera – DPL** (Norma DIN4094): Consiste en un equipo de campo y registro continuo sobre el número de golpes necesarios para hacer penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo. Permite estimar la resistencia del material (suelo) al hincado del cono dinámico. En este caso, la exploración solo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo – arcillosos.

.- **Ensayo de Corte Directo** (Norma ASTM D3080): Permite determinar la resistencia al esfuerzo de corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que se simula a la que existiría en el terreno al aplicarse una carga. Esta resistencia se debe a la cohesión (comportamiento plástico de las partículas de una muestra) y el ángulo de fricción interna o rozamiento entre las partículas granulares.

En base a la información geotécnica recopilada en las calicatas se realiza la clasificación SUCS de los suelos. Esta clasificación fue propuesta por Arturo Casagrande y sus modificaciones fueron realizadas en el año 1942, siendo

actualmente la más utilizada a nivel mundial para la clasificación de suelos desde un punto de vista geotécnico. La SUCS clasifica a los suelos en:

- Suelos de grano grueso
- Suelos de grano fino
- Suelos orgánicos
-

Los suelos de grano grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz No. 200. Los suelos de granos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y si representan más del 50%, los suelos son clasificados como tal, caso contrario son considerados como suelos de grano fino. Cada tipo de suelo se designa por símbolos de grupo acompañados de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en inglés de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas); mientras que, los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos:

<i>G = Grava</i>	<i>C = Arcilla</i>	<i>L = Baja plasticidad</i>
<i>S = Arena</i>	<i>O = Limo o arcillas Orgánicas</i>	<i>W = Bien graduado</i>
<i>M = Limo</i>	<i>H = Alta plasticidad</i>	<i>P = Mal graduado</i>

La segunda muestra debe ser utilizada para el análisis de corte directo; es decir, realizar la aplicación de cargas diferenciadas hasta que la muestra falle, lo cual permite determinar la capacidad portante del suelo (capacidad admisible última). Si la muestra de suelo es grava sin contenido de arena y no es posible aplicar el ensayo de corte directo, se aplica el de densidad máxima y en ambos casos, se estima el valor de capacidad portante.

7.4.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

Estos estudios consideran la recolección, en campo de información sísmica y geofísica, además de la aplicación de técnicas y metodologías orientadas a conocer el comportamiento dinámico del suelo y/o sus propiedades físicas.

.- **Método de H/V:** considera como hipótesis de base que las vibraciones ambientales o microtemores generadas por la actividad humana se deben

principalmente a la excitación de las capas superficiales al paso de ondas superficiales del tipo Rayleigh. El registro de esta información y su interpretación, permite conocer el periodo natural de vibración del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos resultados son correlacionados y complementados con los obtenidos de los estudios geofísicos, geológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geotécnicos. Para los registros de vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 4).



Figura 4: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CitySharp

En la Figura 5, se muestra la disposición del equipo sísmico al momento del registro de información, además de ejemplos de señales de vibración ambiental. La señal registrada en el punto AQ-72 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en AQ-179, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 6), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica,

causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

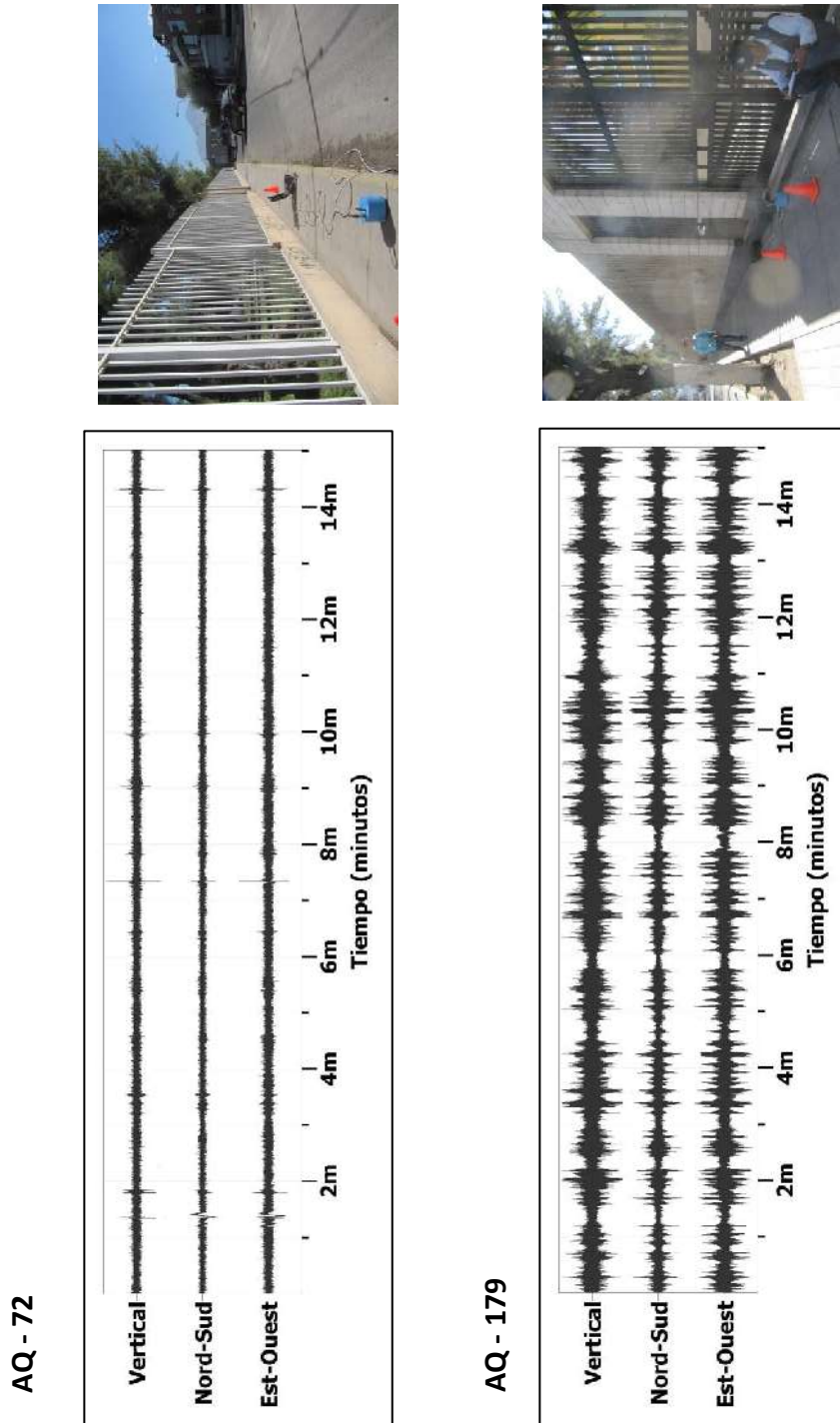


Figura 5: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro con presencia de ruido de fondo (AQ-179) y otro libre de ruido (AQ-72).

Para aplicar la técnica H/V, se considera la siguiente secuencia:

- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar (Figura 6). Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

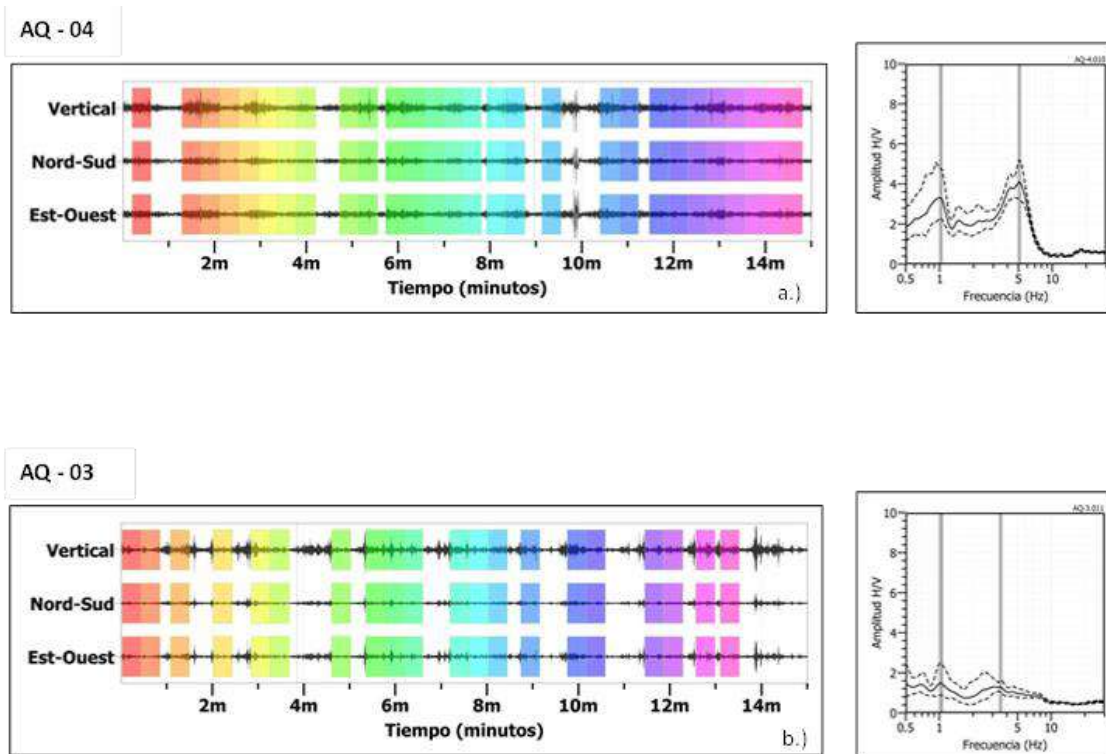


Figura 6: Ejemplos de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. Considerando los casos donde predomina un rango de frecuencias con mayor y menor amplitud. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar..

Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet y Bard, 1994): primero, debe estar presente en un rango de interés que fluctúa entre 1 a 20 Hz; segundo, debe presentar amplificaciones relativas de al menos 2 veces (se considera la amplitud de “1” como punto de referencia) y por último, se considera el pico/rango de frecuencias más representativos para cada punto de medida.

Finalmente, para la presentación de los resultados, las frecuencias son expresadas en periodos dominantes.

.- **Método de Arreglos Lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales (Figura 7). Con este procedimiento se pretende conocer la velocidad de las ondas de corte (ondas S) utilizando el método MASW; es decir, conocer los cambios de velocidades a lo largo de los diversos estratos existentes en el subsuelo.

La aplicación de esta técnica permite determinar las características físicas del subsuelo de manera indirecta, basándose en el comportamiento de las ondas sísmicas al pasar por distintos medios, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte (V_s). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte (V_s) para el punto medio de cada línea de estudio. La aplicación de un nuevo cálculo iterativo inverso, permite conocer el periodo predominante teórico correspondiente al perfil de velocidades, el cual es correlacionado con el obtenido con la técnica H/V a fin de validar ambos resultados.

.- **Método de Prospección Eléctrica:** Tiene por objetivo determinar la distribución real del parámetro resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida. Para ello se considera los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos

convencionales de corriente continua. En este estudio se considera solo los perfiles realizados en la superficie del terreno (Figura 8).

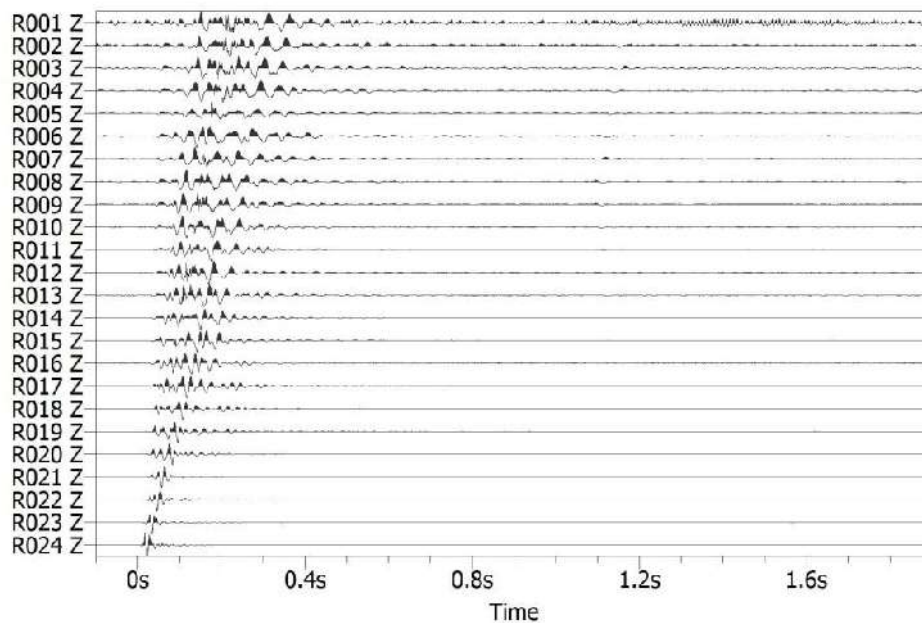


Figura 7: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica y ejemplo del tipo de registro obtenido en la ciudad de Arequipa

Para el análisis de la información obtenida en campo se ha procedido con su calificación en función de la diferencia del potencial con relación al valor de Intensidad de corriente en cada punto de lectura y en conjunto. Este procedimiento permite eliminar la posible influencia de corrientes externas que afecten los valores de resistividad aparente. El procesamiento de los datos (I : intensidad de corriente, V_p : diferencia de potencia y K : constante geométrica del dispositivo), permite conocer los valores de Resistividad y su configuración en el subsuelo, incluyendo la corrección por topografía. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.



Figura 8: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Arequipa

La interpretación de la información considera todos los factores posibles que puedan influir en los resultados; es decir, grado de saturación del terreno, porosidad y la forma del poro, la salinidad del fluido, el tipo y composición de la roca, la temperatura, los procesos geológicos que afectan a los materiales y la presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico. Considerando la existencia de una estrecha relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, es posible definir la posible ubicación de las áreas de filtración y las zonas saturadas en el subsuelo. De existir incrementos de fluidos en el terreno estos se verán reflejados por una disminución en los valores de resistividad.

En este estudio se considera 5 rangos de resistividad (Muy alto resistivo, Alto resistivo, resistivo, bajo resistivo y muy bajo resistivos), los cuales presentan las siguientes características:

.- Muy Alto Resistivo (color rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Debe considerarse que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua, pero si hay presencia de arcilla, su grado de alteración permitiría la disminución en los valores de resistividad del suelo.

.- Alto Resistivo (color anaranjado): Comprende valores entre los 500 y 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a las rocas sedimentarias, ya sean de origen detrítico o químico. Asimismo, incluye a los suelos con muy baja composición de materiales orgánicos.

.- Resistivo o Resistividad Moderada (color verde): Comprende valores entre los 100 y 500 ohm.m. Dentro de este grupo se considera a suelos sedimentarios de composición variada; es decir, arenas, arcillas y limos, cada vez con mayor contenido de materiales orgánicos.

.- Bajo Resistivo (color celeste): Comprende valores entre los 20 y 100 ohm.m. Según Loke (2001), estas resistividades corresponden a suelos saturados de agua y su variación depende de la relación existente entre la resistividad, porosidad y la permeabilidad de los materiales. Así mismo, se puede considerar dentro de este grupo a los suelos orgánicos, arcillosos, limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

.- Muy Bajo Resistivo (color azul): Comprende valores menores a 20 ohm.m. y están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico y/o arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 ohm.m., equivalente al agua de mar.

El resultado final para este tipo de estudio, es una imagen distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos y geotécnicos.

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

La ciudad de Arequipa - Cercado se encuentra ubicada en el borde occidental de la región sur del Perú; por lo tanto, ha sido, es y será afectada en el tiempo por sismos de variada magnitud que pueden o no causar daños en superficie. Desde este punto de vista, es importante conocer las características de la actividad sísmica en la región, así como estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud.

8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región sur presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Figura 9). Una de estas ciudades es Arequipa y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1604 (8.0Mw), 1868 (8.5Mw) y 2001 (8.0Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en sus construcciones precarias de sillar, además de algunos escenarios de licuación de suelos. En la Figura 10, se presenta el mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada (MM) para el periodo 1961 a 2014, observándose que los sismos antes mencionados, han generado en la zona costera de la región sur intensidades de hasta VIII (MM), lo cual implica daños mayores principalmente en viviendas de sillar, tal como ocurrió con la Catedral de dicha ciudad en el año 2001.

Posteriormente, los sismos de 1979 y 2001 fueron los que causaron mayor daño en la ciudad, principalmente este último debido a la elevada magnitud que alcanzo el evento (8.2 Mw). Según Tavera et al (2002), el sismo del 2001 produjo una área de ruptura del orden de 350x100 km², siendo el eje mayor paralelo a la línea de costa, causando daños y efectos desde Ocoña hasta la península de Ilo en Moquegua. El proceso de ruptura de este evento concluyo con la ocurrencia de tres

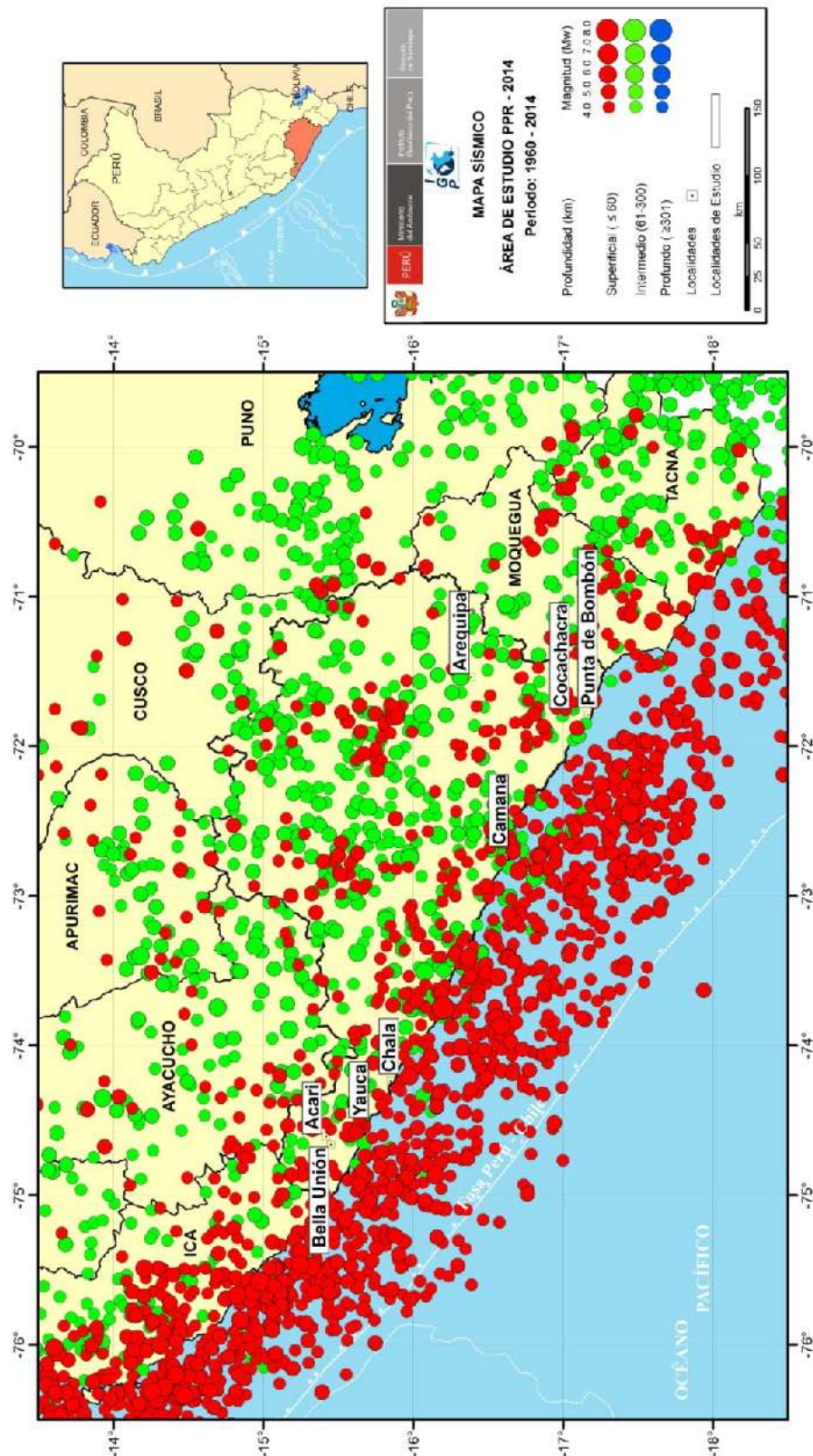


Figura 9: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

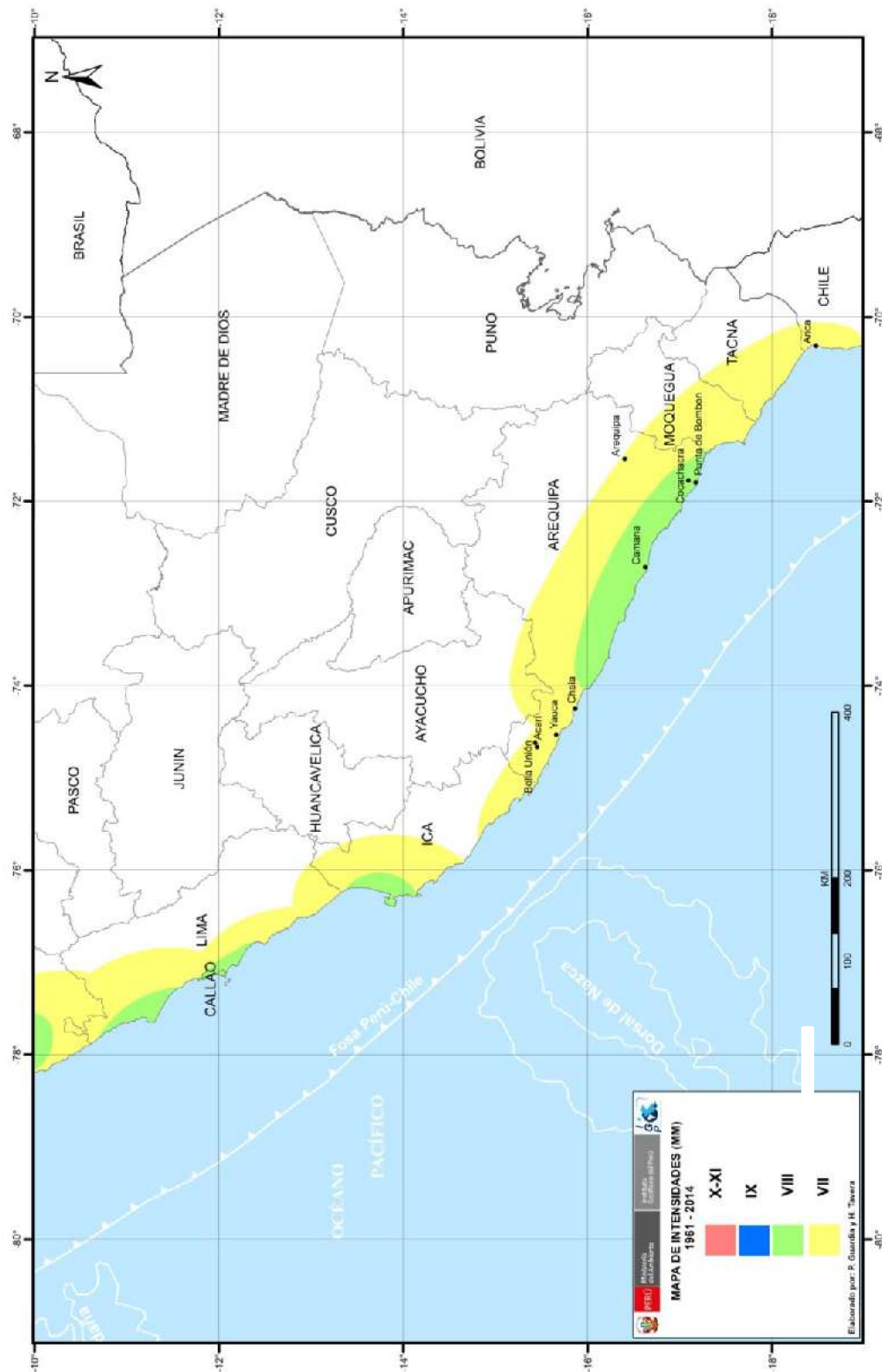


Figura 10: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

importantes réplicas y de ellas, dos presentaron sus epicentros entre las ciudades de Camaná y Punta de Bombón. Según la Figura 11, el sismo del 2001 produjo en la ciudad de Arequipa – Cercado intensidades de VII (MM) produciendo daños y efectos en viviendas, iglesias y principalmente, la Catedral de la ciudad de Arequipa. Asimismo, el tsunami que siguió al sismo mayor, presentó mayor intensidad y daños en el área costera de la ciudad de Camaná. Según INDECI, la estadística de daños y efectos en la provincia de Arequipa fueron (Figura 12):

- Población damnificada: 25,782. Heridos: 1,422. Fallecidos: 7
- Viviendas afectadas: 5,332. Colapsadas: 1,631
- Centros educativos afectados: 219. Destruídos: 587
- Centros de Salud afectados: 27
- Puentes averiados: 10

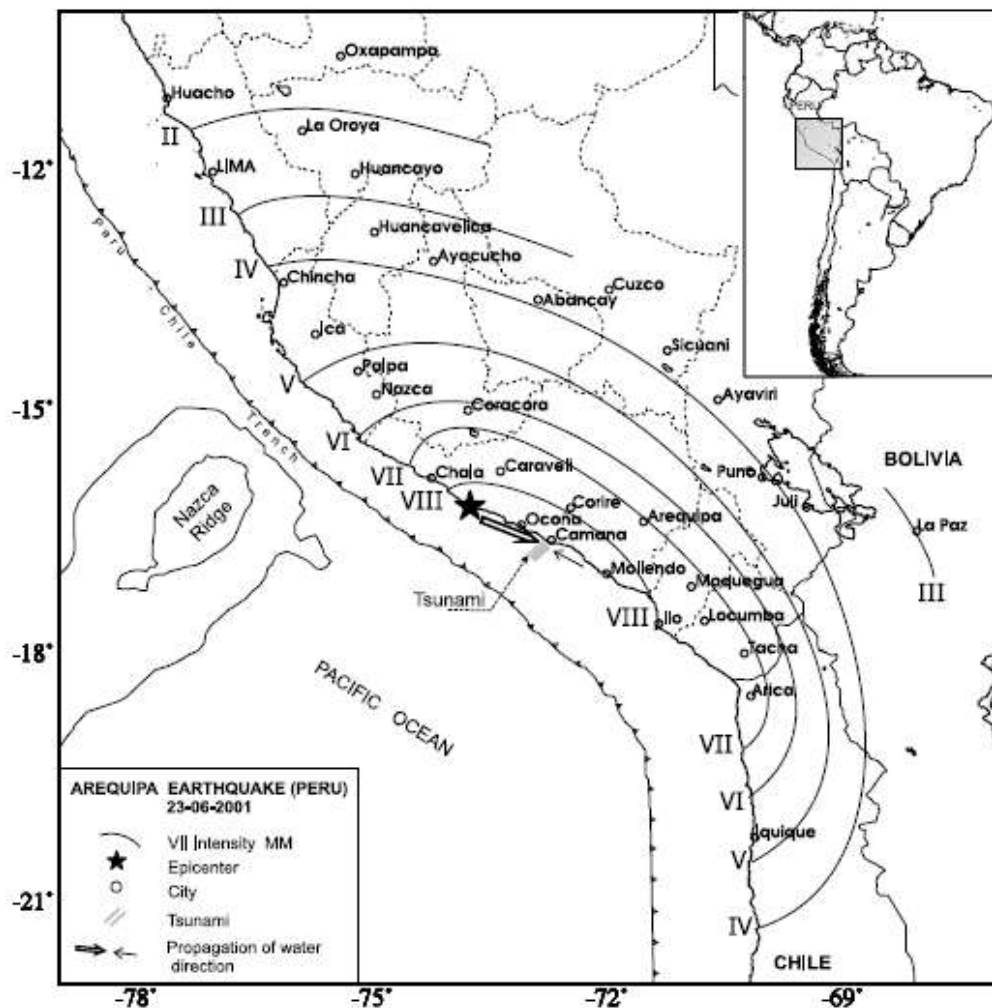


Figura 11: Mapa de intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 23 de junio de 2001 (Tavera y Buforn, 2001)

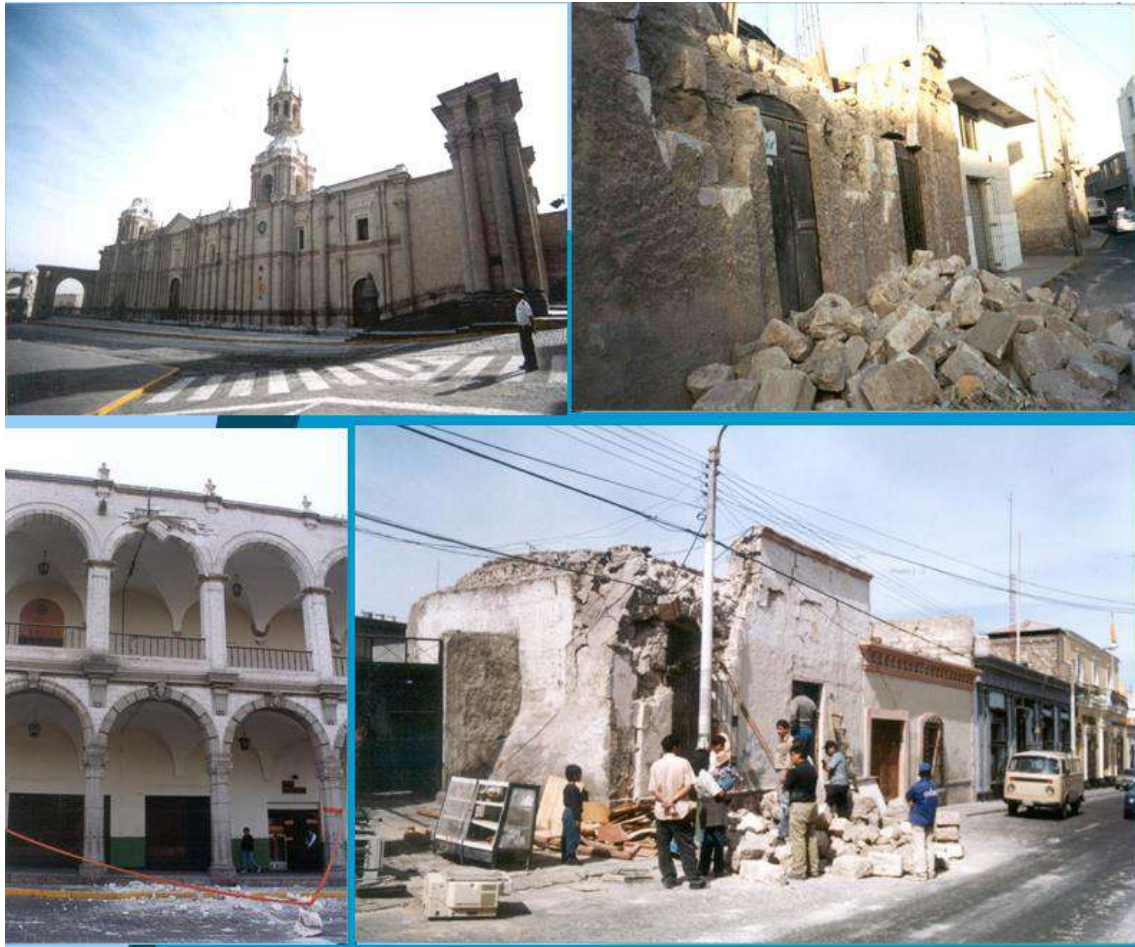


Figura 12: Daños en viviendas e iglesias en la ciudad de Arequipa – Cercado debido al sismo del 2001

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que el sismo ocurrido en el año 2001 habría liberado aproximadamente el 60% de la energía acumulada en la zona costera de la región sur del Perú desde el año 1868; por lo tanto, la energía restante debe ser liberada por otro evento sísmico que involucra un área de ruptura por debajo de la península de Ilo, y que produciría en la ciudad de Arequipa - Cercado niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001. Esta información es corroborada por estudios realizados por Chilif et al (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En la Figura 12, se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-3 la que tiene una alta probabilidad de generar un evento sísmico de gran magnitud en la región. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

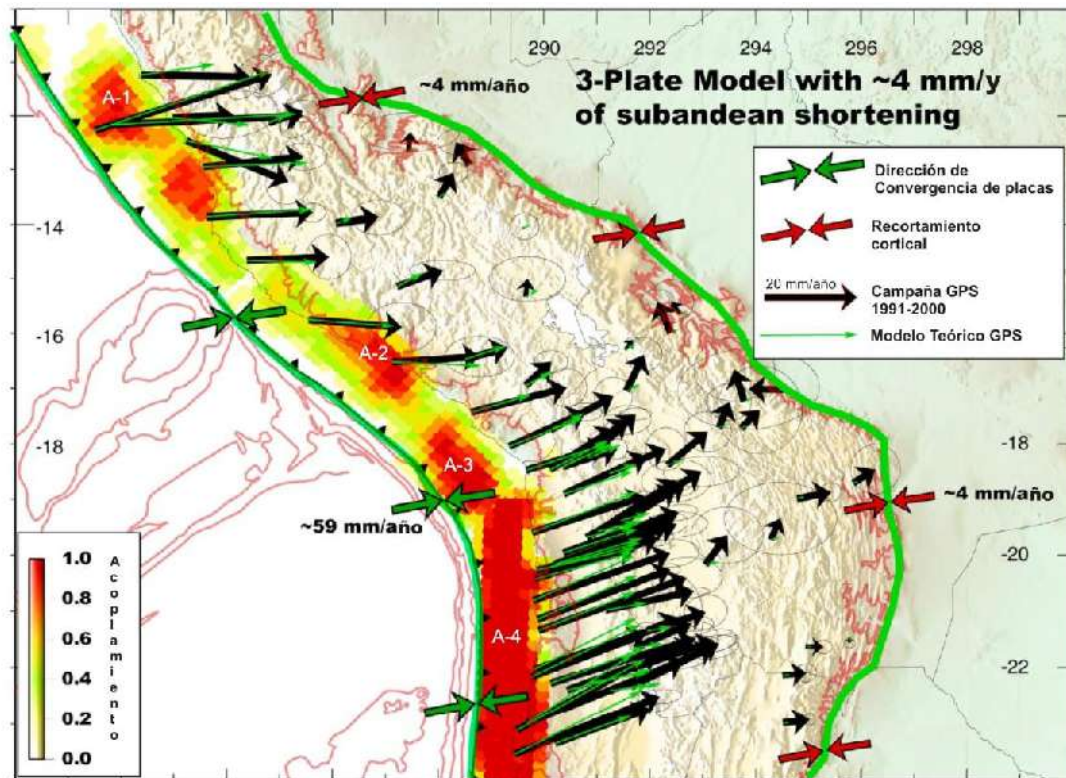


Figura 13: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

8.2.- Peligro Sísmico

Esta metodología permite conocer, en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso de tiempo. Este parámetro es expresado en términos de aceleración. Para tal efecto, se hace uso del catálogo sísmico y fuentes sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2014), las ecuaciones de atenuación definidas por Young et al (1997) para fuentes de subducción y de Sadigh et al (1997) para las fuentes continentales. El algoritmo utilizado para el cálculo del peligro sísmico es el CRISIS-2007 (Ordáz et al, 2007).

Para el área que abarca la ciudad de Arequipa - Cercado se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 340 a 360 gals (Figura 14), equivalentes a intensidades del orden de VII (MM); es decir, suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos, tal como ocurrió con el sismo de Arequipa del 2001 (Tavera, 2001) y Pisco 2007 (Tavera, 2008).

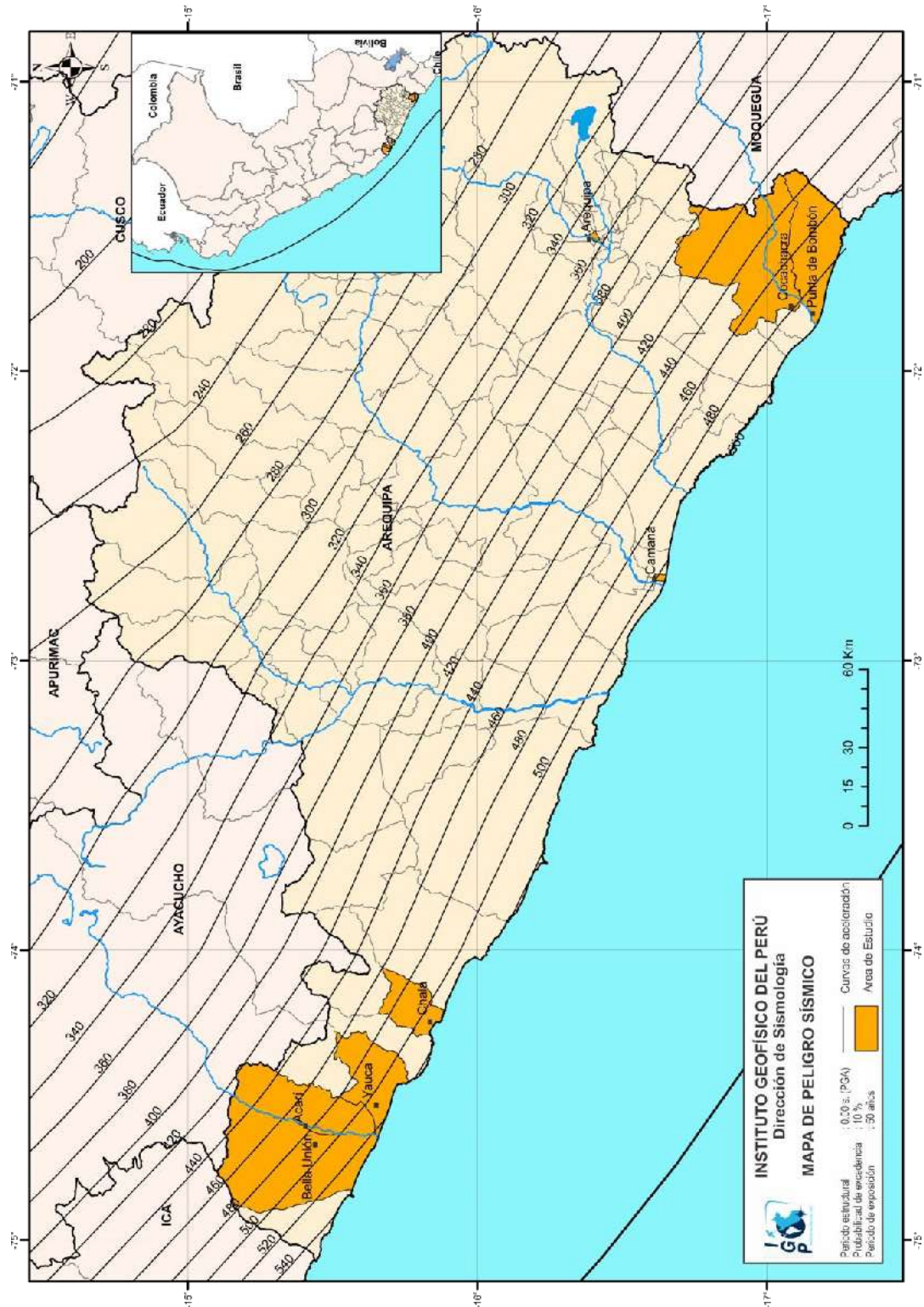


Figura 14: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores son el resultado de la interacción de fuerzas endógenas y exógenas. Las primeras actúan como fuerzas creadoras de las grandes elevaciones y depresiones formadas principalmente por movimientos de componente vertical y las segundas, como desencadenantes de una continua denudación que tiende a rebajar el relieve originado, estos últimos llamados procesos de geodinámica externa que se agrupan en la cadena de meteorización-erosión, transporte y sedimentación (Gutiérrez, 2008).

Para este estudio, en base de la topografía de terreno y el uso de herramientas computacionales como SIG y CAD se ha elaborado el mapa digital de terreno y plano de pendientes a fin de delimitar las características del terreno, las mismas que fueron verificadas y validadas durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Arequipa – Cercado.

El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:5000, resolución espacial de 5 metros y referenciada al geoide WGS84 (Zona 18S). El MDT elaborado se presenta a escala gráfica de 1:20000 y cubre un área de 13 km² (Figura 15). La ciudad de Arequipa – Cercado se asienta sobre un abanico aluvial con alturas entre 2200 a 2400 m.s.n.m.

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. La ciudad de Arequipa - Cercado se encuentra sobre terrenos cuyas pendientes son menores a 5°; por lo tanto, presenta un terreno casi plano, aunque en el distrito de Selva Alegre se presentan pendientes entre 60° y 80° correspondientes a cortes de taludes generados por la actividad antrópica (Figura 16).

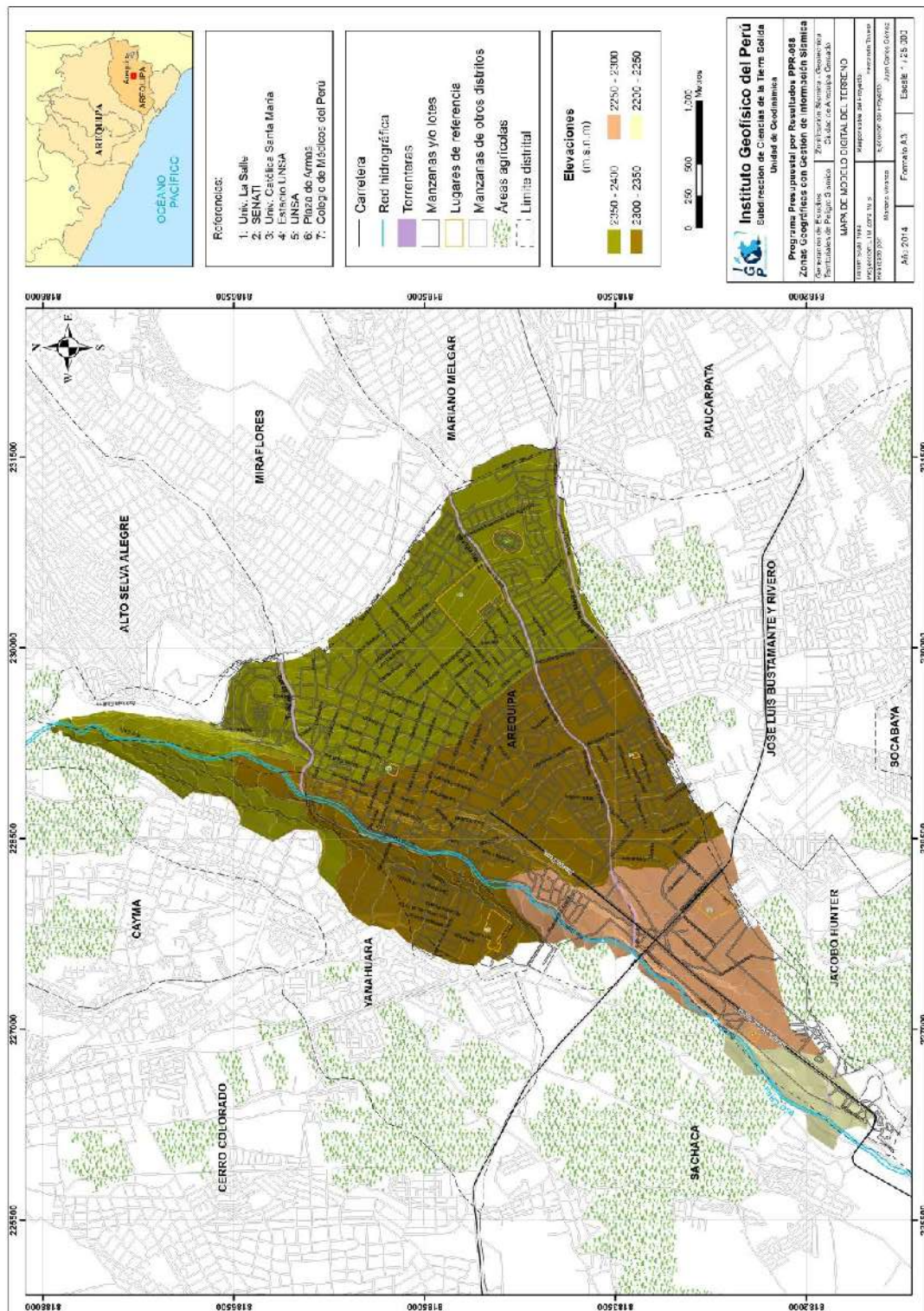


Figura 15: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores

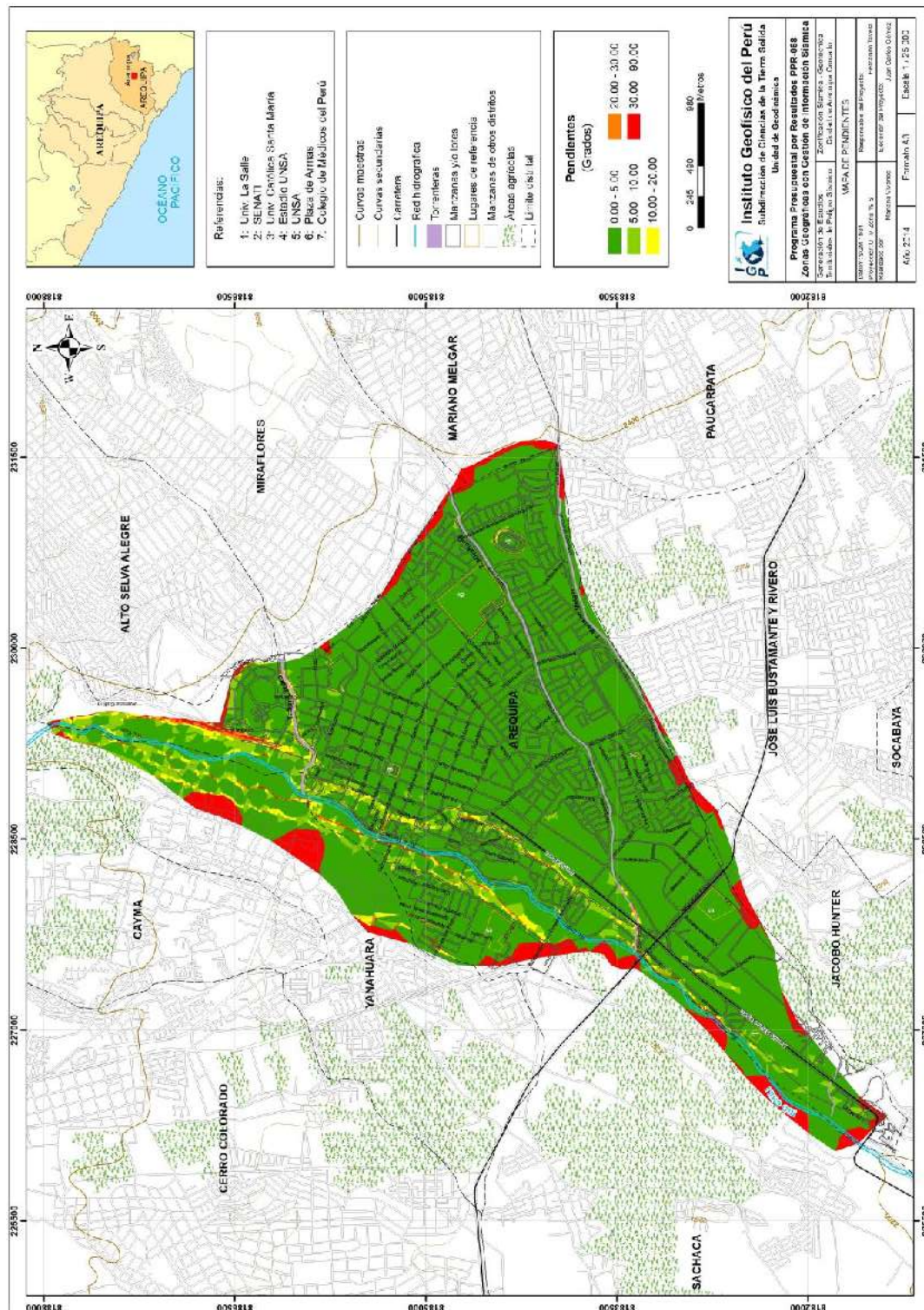


Figura 16: Mapa de pendientes para la ciudad de Arequipa- Cercado y alrededores

9.1.1. Unidades Geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Arequipa - Cercado se ha identificado la existencia de 4 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 17):

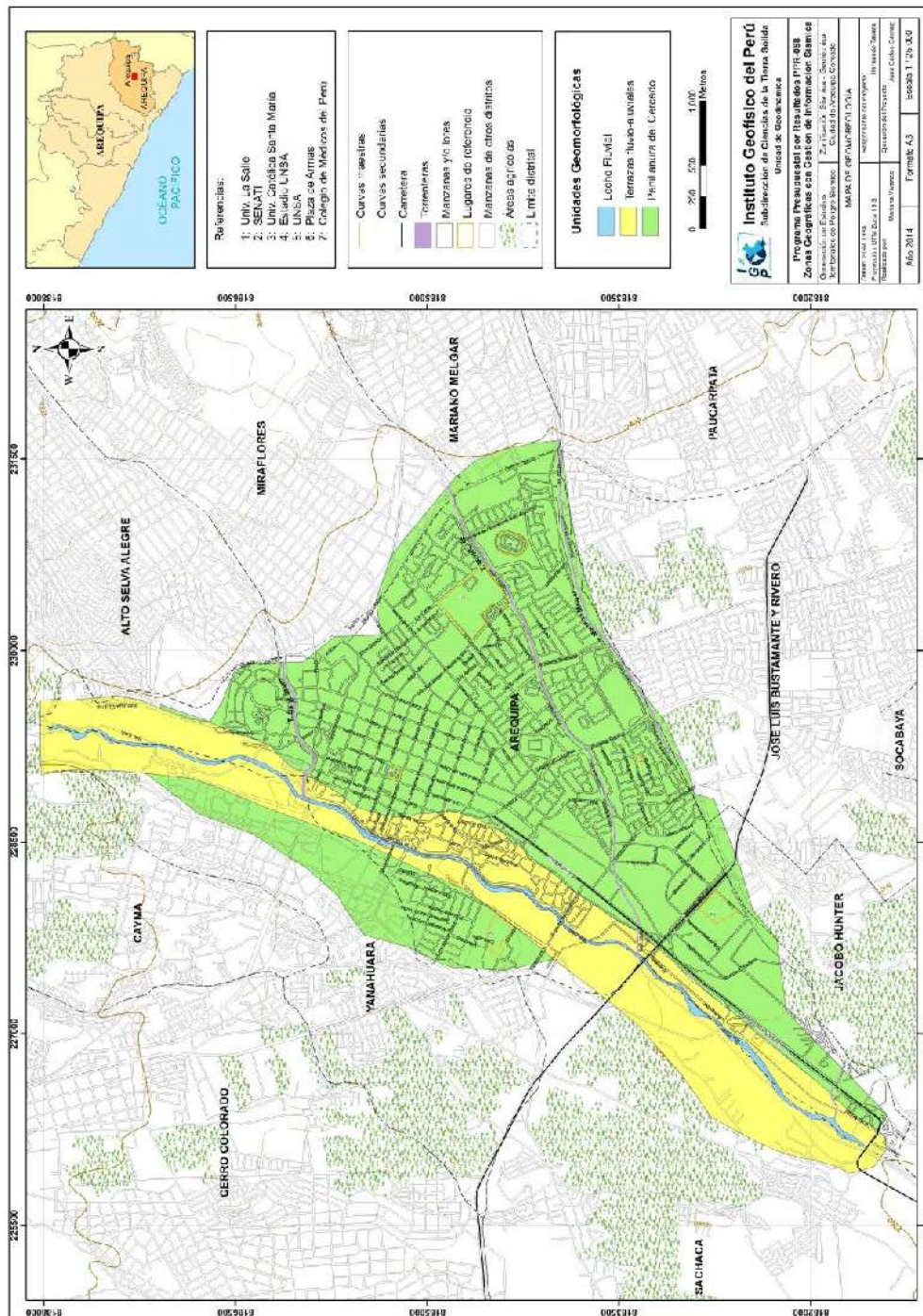


Figura 17 Mapa geomorfológico de la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores

9.1.1.1.- Origen Deposicional

La ciudad de Arequipa - Cercado se asienta sobre el Valle del río Chili conformado por una penillanura ligeramente plana e inclinada hacia el Suroeste (4 %). Esta geoforma es producto del levantamiento de la cordillera del Barroso y las rocas ígneas de la caldera, resultaron ser la base de deposición de materiales de distinta naturaleza que dieron lugar a la nivelación de la superficie. Los suelos están conformados por materiales tufaceos hacia el Oeste y detríticos hacia el Este (Kosaka, 2000). Sobre la esta penillanura se ha desarrollado el casco urbano de la ciudad de Arequipa o distrito de Arequipa - Cercado. De acuerdo a lo descrito, se ha identificado las siguientes unidades geomorfológicas:



Figura 18: La mayor superficie del área urbana de la ciudad de Arequipa se asienta sobre la penillanura presente en el valle del río Chili

. - Penillanura del Cercado: Conocida también como Superficie del Cercado (pendiente de 5° hacia el Suroeste), está conformada por materiales fluvio-aluviales (cantos, gravas, arenas) con contenido de material volcánico que procede de las partes del volcán Misti (ubicado aproximadamente a 11 km de la ciudad) en forma de aluviones. El material depositado y/o acumulado a adoptado una forma plana con ligeras ondulaciones de gran extensión y sobre la cual se asienta la ciudad de Arequipa y se ha desarrollado el casco urbano de los principales distritos (Figuras 18 y 19). La penillanura es atravesada por Quebradas activas en épocas de precipitaciones pluviales (Enero-Marzo) e inactivas el resto del año, siendo conocidas comúnmente como torrenteras. Cuando las precipitaciones pluviales superan los 160 mm mensuales, el agua

que discurre por estas, superan la capacidad de embalse haciendo que se desborde provocando inundaciones y causando daños a la infraestructura de la ciudad. El 90 % del terreno de Arequipa Cercado se encuentra urbanizado.



Figura 19: Penillanura del Cercado de Arequipa ocupado en un 90% de su superficie, el 10% restante corresponde a terrenos de cultivo alimentados por el río Chili.

.- **Terrazas aluvio-fluviales:** Ubicadas a ambas márgenes del río Chili, principalmente en sus extremos Noreste y Suroeste. Están formadas por la acumulación y/o deposición de la carga aluvio-fluvial e incisión del mismo y conformadas por materiales como gravas, limos y arenas (Figura 20). Actualmente, son utilizadas para la actividad agrícola sobre una superficie que representa el 10 % del área de Arequipa - Cercado



Figura 20: Presencia de terrazas acondicionadas para la siembra en la ciudad de Arequipa - Cercado.

9.1.1.2.- Origen Aluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968). En las inmediaciones del distrito de Arequipa - Cercado se han identificado una serie de sistemas hidrológicos que se activan en épocas de precipitaciones pluviales extremas (Enero-Marzo) e inactivas el resto del año, conocidos comúnmente como torrenteras. El agua que discurre por estas desde las partes altas, muchas veces superan la capacidad de embalse haciendo que se desborde provocando inundaciones y la generación de flujos de detritos que causan daños a la infraestructura de la ciudad. Las geoformas que comprenden esta clasificación son:

.- **Torrenteras:** En la ciudad de Arequipa existen 7 torrenteras y de ellas, 3 pasan por el distrito de Arequipa Cercado: San Lázaro, Miraflores y Mariano Melgar: estas torrenteras tienen su punto de origen en los flancos del volcán Misti. En épocas de lluvias se comportan como colectores secundarios naturales que desembocan sobre el colector principal, el río Chili (Figura 21x).



Figura 21: Torrentera de Miraflores ubicada en la Avenida Venezuela. Actualmente, se encuentra en estado de restauración después de las inundaciones del año 2013.

.- **Torrentera San Lázaro:** Conocida como Segunda Torrentera, tiene origen en la Quebrada del mismo nombre sobre una longitud de 13 km, desde su nacimiento (flancos del volcán Misti) hasta la desembocadura en el río Chili. La torrentera pasa por el distrito de Arequipa sobre una distancia de 1.50 km

aproximadamente, desembocando luego a 40 metros aguas arriba del puente Grau (Figura 22). La torrentera San Lázaro soporta un caudal máximo de $43.74 \text{ m}^3/\text{s}$ y presenta sobre su cauce seco materiales como gravas, arenas y limos de forma redondeada a subredondeada que han sido transportados desde su origen.



Figura 22: Desembocadura de la torrentera San Lázaro en el río Chili a la altura del puente Grau.

.- **Torrentera Miraflores:** Conocida como la tercera Torrentera, se origina en el cerro Botadero y sigue un rumbo Noroeste-Sureste para luego desembocar en el río Chili a 90 metros aguas arriba del puente San Isidro, en donde toma una dirección Noreste-Suroeste. Este cambio en la dirección de su cauce es debido a la acción antrópica producido por el crecimiento urbanístico de la ciudad que ha invadiendo su cauce. En el distrito de Arequipa - Cercado recorre una distancia de 4 km hasta su desembocadura, soportando un caudal máximo de $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 23).

.- **Torrentera Mariano Melgar:** Conocida como cuarta Torrentera, tiene su nacimiento en las Quebradas el Chilcal y Guarangal, llegando a tomar en la ciudad de Arequipa una dirección Este-Oeste sobre una distancia de recorrido de 6.5 km hasta su desembocadura a 350 metros, aguas arriba del puente Tingo. La torrentera recorre toda la Avenida Los Incas con un caudal máximo de $69.2 \text{ m}^3/\text{s}$, ver Figura 24.



Figura 23: Desembocadura de la torrentera Miraflores en el río Chili a la altura del puente San Isidro.



Figura 24: Torrentera mariano Melgar mostrando su cauce seco debido a la ausencia de precipitaciones.

9.1.1.3.- Origen Fluvial

El modelado eólico presente en la zona de estudio resulta de la acción continua del viento que ocasiona la erosión, transporte y depositación de material sedimentario fino característico de la granulometría de las arenas. Los ríos son esencialmente agentes de erosión y de transporte que suministran a los océanos agua y sedimentos procedentes del continente. A pesar de que $<0.005\%$ del agua continental se encuentra en los ríos en un momento determinado, el flujo del agua es una de las fuerzas más importantes que operan en la superficie terrestre (Knighton, 1998). La ciudad de Arequipa - Cercado, como se escribió líneas arriba,

se asienta sobre el Valle del río Chili conformado por una gran penillanura que es cortada por el río del mismo nombre, además de algunas Quebradas que se originan en el cuerpo volcánico del Misti, para luego desembocar en el río Chili y que se mencionan a continuación:

.- **Lecho fluvial:** Corresponde a las áreas por donde discurren las corrientes de aguas permanentes. En Arequipa - Cercado, el río Chili es de curso permanente con una dirección Noreste-Sureste. En el área de estudio recorre 6.5 km, transportando gravas, arenas y limos por arrastre, saltación y rodamiento en el fondo (Figura 25). Cuando las precipitaciones pluviales llegan a más de 150 mm mensuales, el caudal se incrementa e invade las partes bajas inundando terrenos de cultivo y la infraestructura física de la ciudad.



Figura 25: Flujo hídrico permanente y caudal controlado del río Chili.

9.2.- Geología

La geología es la ciencia que se encarga del estudio de la tierra teniendo en cuenta aspectos como: origen, estructura, composición, evolución, así como los distintos procesos internos y externos que se desarrollan en ella a través del tiempo. Para la comprensión de dichos procesos es necesario la interacción de la geología con otras disciplinas como:

Geología histórica: Se encarga del estudio de los distintos procesos por los que ha pasado el planeta Tierra, desde su origen hasta la actualidad, para ello se creó una división cronológica conocida como la escala del tiempo geológico que se subdivide en: eras, períodos, edades, etc.

Geología estructural: Se encarga del estudio del comportamiento de la corteza terrestre ante la acción de los diversos esfuerzos tectónicos que generan diversidad de estructuras geológicas tales como: pliegues, fallas, estratificaciones, entre otros.

Además, existen otras disciplinas como la vulcanología, geomorfología, geodinámica y geotecnia, encargadas del estudio de las rocas para la extracción de depósitos de minerales, hidrocarburos, aguas subterráneas, entre otros.

Por otro lado, el campo de aplicación de la geología es muy variado; sin embargo, en el presente estudio se hace incidencia en el reconocimiento de las propiedades físicas de las rocas y suelos sobre los cuales se asientan las áreas urbanas. Las distintas estructuras que se presentan en sus alrededores, las geoformas existentes y los eventos geodinámicos internos y externos, a fin de determinar el comportamiento del terreno ante la presencia de los distintos procesos geológicos que puedan suscitarse.

Para el estudio geológico de la ciudad de Arequipa-Cercado, se hace uso de la información contenida en el compendio de geología regional de INGEMMET (a escala regional 1:100000), complementado con la geología local obtenida en base al cartografiado realizado en campo (escala 1:5000). Se debe describir las principales unidades litológicas aflorantes y sus características a fin de concretizar el estudio de Zonificación Sísmica - Geotécnica de la ciudad de Arequipa - Cercado.

9.2.1- Geología Regional

En el contexto regional, el suelo de la ciudad de Arequipa-Cercado está conformado por el gneis de edad Precambriana como parte del Complejo Basal de la Costa y que aflora al Noroeste fuera del área de estudio. En el área de la ciudad y alrededores se observa la presencia de depósitos aluviales limitados por

tufosvolcánicos (Oeste) y flujos de lodo (Este), y que corresponden a sedimentos detríticos como arenas, arcillas y limos que engloban a guijarros, cantos rodados y bloques con algunos restos de piedra pómez. Según la Figura 26, afloran depósitos que pertenecen al Cenozoico representados por el Grupo Barroso (Flujos de Barro), y Depósitos Recientes (aluviales y eluviales).

COLUMNA LITOCRONOESTRATIGRÁFICA			
ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD Y DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Eluviales Qh-el
			Dep. Aluviales Qh-al
		Pleistoceno	Discordancia
			Flujos de barro Qp-Fb
			Discordancia
			Volc. Barroso
	NEOGENO	Plioceno	Gpo. Barroso
			Volc. Chila
		Mioceno	Discordancia
			Volc. Sencca Tp-vs

Figura 26: En la columna, los colores rosa corresponden a las unidades aflorantes y las de plomo, al basamento en la ciudad de Arequipa-Cercado (Vargas, 1970)

9.2.2- Geología Local

En la ciudad de Arequipa-Cercado se han reconocido la existencia de 3 unidades geológicas del período Cuaternario, Holoceno y Pleistoceno (12000 años). Estas unidades son los depósitos de Flujo de barro, depósitos aluvio fluviales y depósitos aluviales. El mapa geológico local de la Figura 27 ha sido elaborado considerando toda la información existente en formato impreso y digital complementada con la información recolectada in situ a escala 1:5000 y que en conjunto permitió construir el mapa de geología a escala 1:20000.

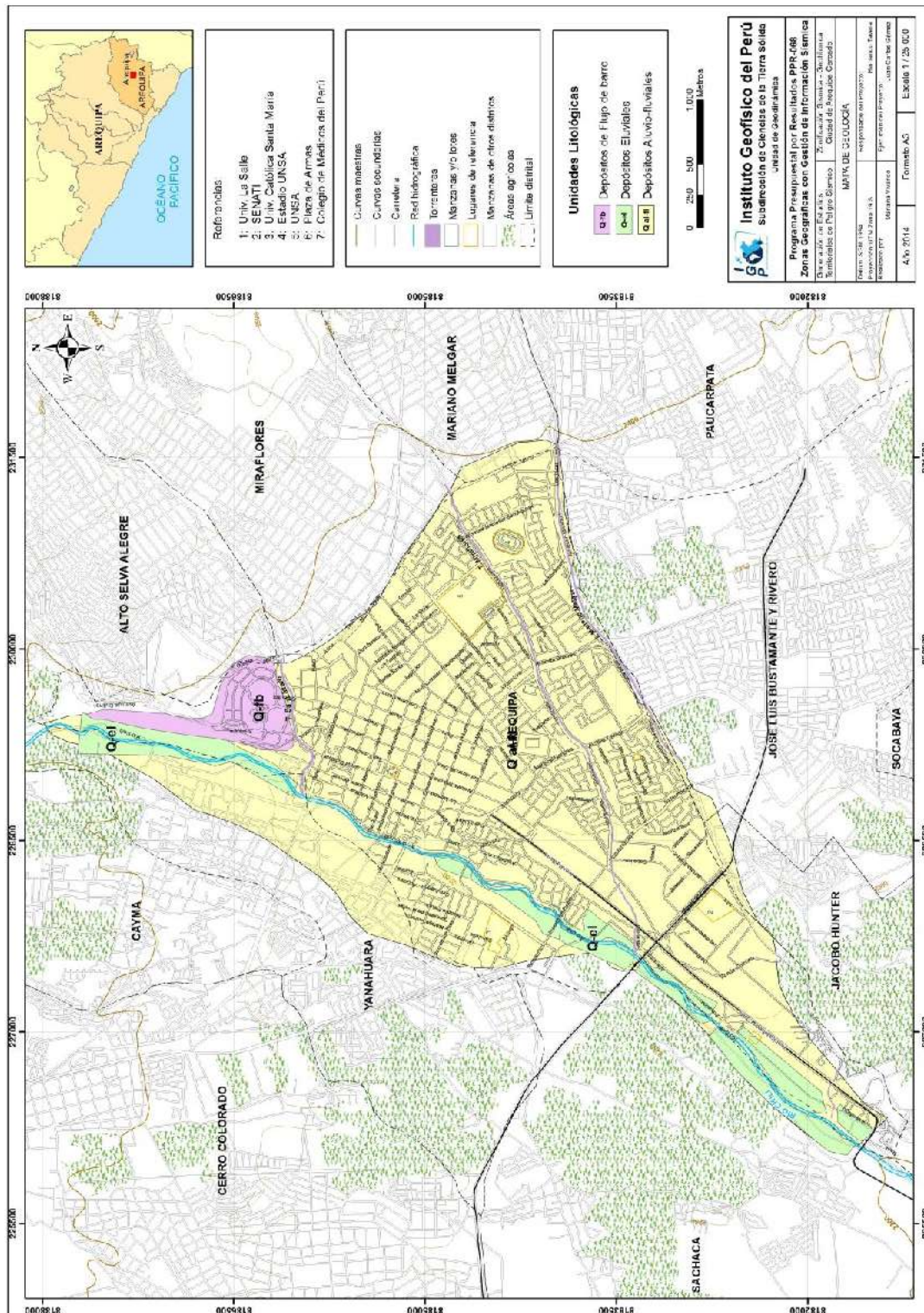


Figura 27: Mapa geológico local de la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores

.- Depósitos Cuaternarios

En el área de estudio el basamento rocoso más importante corresponde al Volcánico Barroso que yace sobre los Volcánicos Chila y Sencca con discordancia erosional, y que ocasionalmente se le encuentra debajo de los depósitos de flujos de barro, fluvio-glaciares y aluviones recientes. Su litología consiste en lavas andesíticas en bancos gruesos, gris oscuras a gris claras, que por intemperismo toman colores rojizos y marrones. Sobreyace a esta unidad los Flujos de Barro (unidad que aflora en el distrito de Arequipa-Cercado) con las siguientes características:

***.- Flujos de barro (Q-fb):** Estos flujos están presentes en el distrito de Socabaya, Hunter y en las faldas occidentales del Misti, además de remanentes presentes en el extremo Noreste de la ciudad, parque Selva Alegre (Figura 28). Los flujos consisten en masas formadas por fragmentos y bloques angulares de rocas de origen volcánico (tufos y lavas), dentro de una matriz areno tufácea o arcillosa poco consolidada. El origen del material es por acumulación de material piroclástico y clastos de naturaleza volcánica en lugares de gran pendiente que se movilizaron por la saturación de las aguas provenientes de las precipitaciones o deshielos, perdiendo velocidad, hasta ocupar los lugares actuales.*



Figura 28: Depósitos de flujos de barro de color rosáceo y que afloran en el callejón Ripacha

.- Depósitos aluvio-fluvial (Qr-af): Estos depósitos constituyen la penillanura de Arequipa (Figura 29), además de estar presentes en el lecho del río Chili en forma de terrazas. Están conformados por secuencias alternadas de gravas, arenas y limos. En las Quebradas (torrenteras), estos materiales rellenan su cauce y presentan formas redondeados a subredondeados.



Figura 29 Depósitos de materiales aluvio fluviales sobre los cuales está asentada la ciudad de Arequipa - Cercado. El material presenta diferentes tamaños.

.- Depósitos eluviales (Qr-el): Son conocidos comúnmente como suelos residuales que se forman in situ. En la ciudad de Arequipa-Cercado abarcan los terrenos de cultivo conformados por composiciones de arenas limosas de color marrón oscuro (Figura 30).

9.3.- Geodinámica

La geodinámica abarca el estudio de los procesos y cambios físicos que ocurren constantemente sobre la superficie de la Tierra. Estas transformaciones son posibles debido a la intervención de agentes internos y externos que crean, forman, degradan y modelan la superficie terrestre. Esta rama de la geología se subdivide en:

.- Geodinámica Interna: El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la interacción de las placas Sudamericana y Nazca,

escenario considerado como la primera fuente sismogénica en el Perú debido a la frecuencia de sismos y por dar origen a los eventos de mayor magnitud. La segunda fuente, la constituye la zona continental, cuya deformación ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores (Cahill et al, 1992; Tavera et al, 2001). Históricamente, la ocurrencia de sismos en la zona de estudio, se constituye como el principal detonante de eventos geodinámicos como los movimientos en masa, la caída de rocas y derrumbes.



Figura 30: Suelos residuales presentes en ambos márgenes del río Chili, siendo utilizados como terrenos de cultivo.

. - **Geodinámica Externa:** La geodinámica externa estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra. En tal sentido, las precipitaciones pluviales son las de mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de los Movimientos en Masa (MM), como los deslizamientos, derrumbes y caída de rocas; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren este tipo de eventos.

Además, la presencia de “El Niño” ocasiona el incremento de la temperatura en la superficie del mar, provocando lluvias torrenciales con valores que sobrepasan los índices normales de precipitaciones en la costa; mientras que, en la sierra y en especial en el altiplano, las lluvias son escasas, presentándose estadios largos de

sequias. Históricamente, las condiciones descritas en la costa centro y norte del territorio peruano son debidas a la presencia de “El Niño” y a otros factores relacionados con la actividad antrópica.

La geodinámica interna y externa presente en la zona de estudio, es la responsable de modelar la superficie, creando geoformas que han sido objeto de estudio en capítulos anteriores. A continuación, se analiza los procesos dinámicos que se desarrollan en la ciudad de Arequipa-Cercado, tales como los movimientos en masa y las inundaciones (Figura 31).

9.3.1.- Movimientos en Masa (MM)

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan laderas abajo, rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). Para proceder a la clasificación de los movimientos en masa en la ciudad de Acarí, se hace uso de las tablas propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988). Estas tablas tienen en cuenta el tipo de movimiento y el tipo de material. En cuanto al primero, se considera 5 clases: caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Dentro de los materiales se consideran: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras. El trabajo de campo realizado en la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores, ha permitido identificar dos tipos de eventos: los derrumbes (tipo de movimiento) y las inundaciones por torrenteras y sus características son:

- Derrumbes: *Son movimientos de tierra que se desarrollan de forma rápida sobre superficies con pendientes $>30^\circ$, sea por efecto de la gravedad o por inestabilidad del material debido a los factores naturales como el clima, topografía, sismos, composición de suelos, entre otros; demás, de antrópicos por construcción de casas, excavación de pendiente o laderas, entre otros.*

La ciudad de Arequipa - Cercado, se encuentra rodeada por el complejo volcánico Chachani-Misti-Pichu Pichu. El volcán Misti está ubicado a 13 km de la ciudad y es considerado como activo; es decir, que se producen sismos de origen volcánico (sismos híbridos: asociados a la ascendencia de magma), no percibidos por la población, pero que a través del tiempo desestabilizan los terrenos. Se debe sumar a este factor la actividad antrópica debido a que la población realiza cortes de talud para fines urbanísticos. En el extremo Norte de la ciudad de Arequipa - Cercado, se ha identificado la presencia de un área

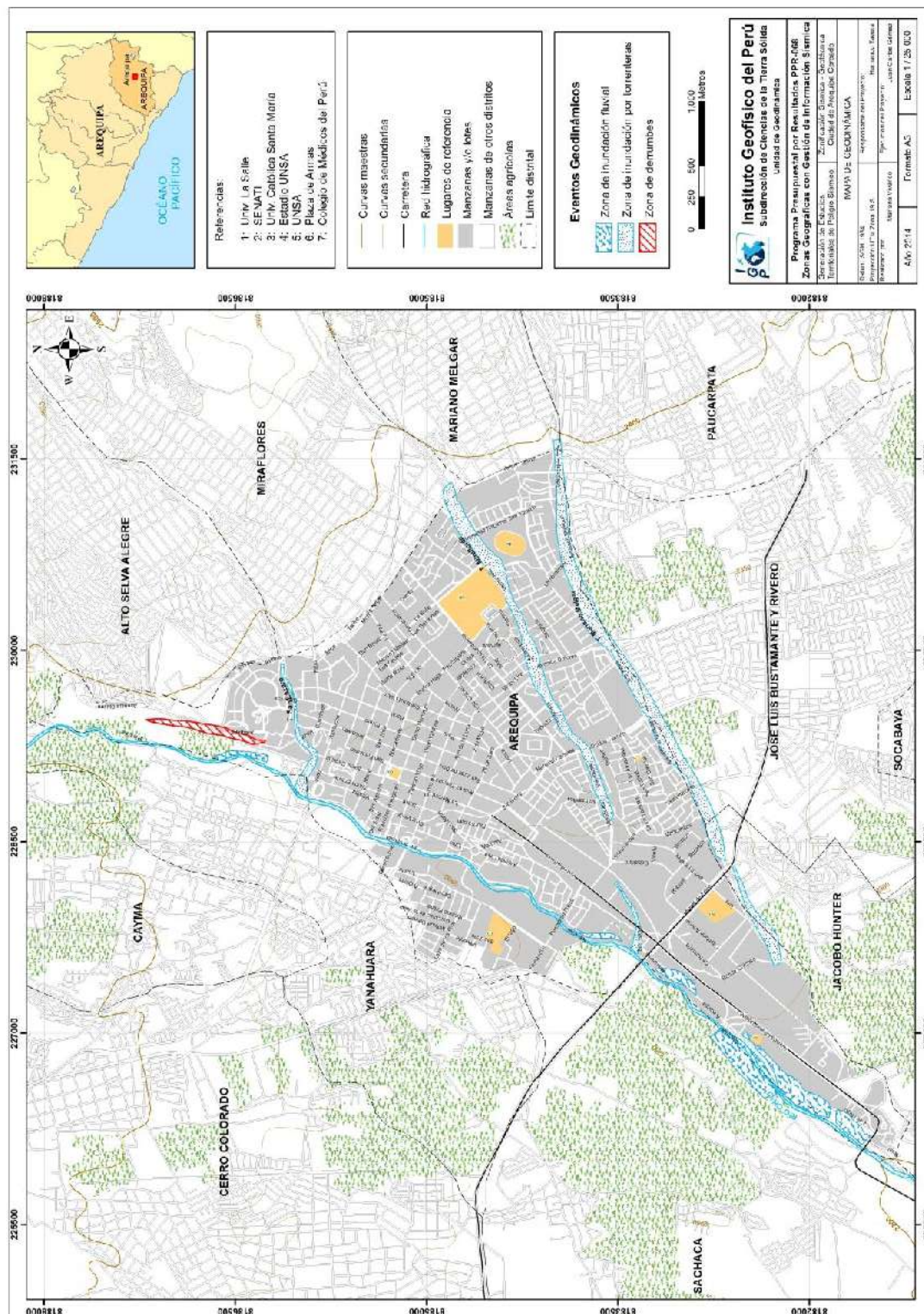


Figura 31: Mapa geodinámico de la ciudad de Arequipa - Cercado y alrededores.

susceptible a derrumbes (Figura 32), con una longitud de 400 metros entre el puente Chilina (Chilina) hasta el inicio de la av. Raúl Haya de la Torre. La composición litológica de estos suelos es de flujos de barro. Los agentes detonadores para los derrumbes son las precipitaciones entre los meses de Enero a Marzo, el riego de terrenos y cortes de talud para ampliar caminos (actividad antrópica).

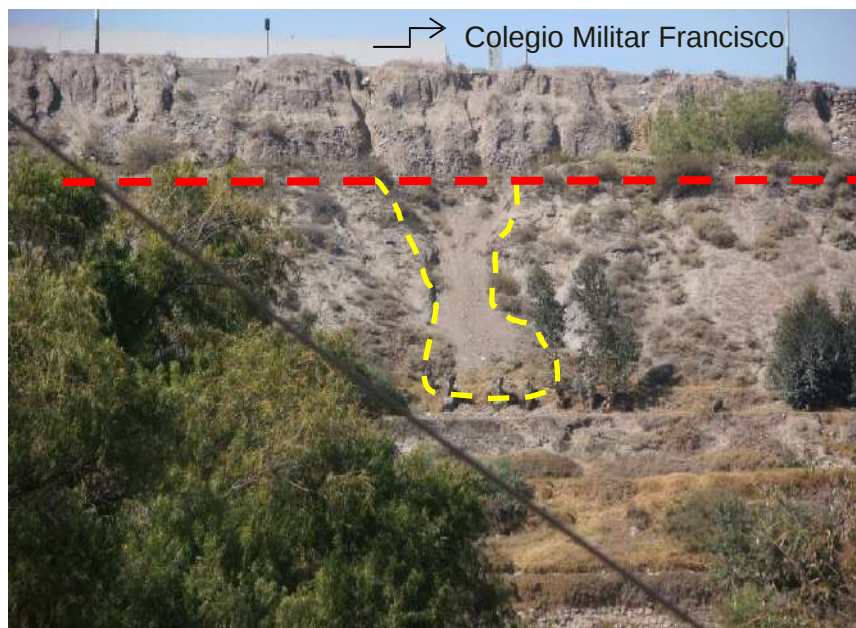


Figura 32: Derrumbe de materiales por acción antrópica por ampliación de carreteras en terrenos de cultivo y por precipitaciones en terrenos superiores cerca del colegio Militar Francisco Bolognesi.

. - Zonas de inundación por torrenteras: La ciudad de Arequipa - Cercado se encuentra a una altura de 2300 m.s.n.m en el valle del río Chili, está rodeada por volcanes que sobrepasan los 5000 m.s.n.m y en sus flancos, nacen un gran número de quebradas conocidas comúnmente como torrenteras que transportan agua en periodos de lluvias (Diciembre-Abril) para luego desembocar en el río Chili. Las torrenteras que atraviesan a la ciudad de Arequipa - Cercado son las de San Lázaro, Miraflores y Mariano Melgar, todas encausadas por la actividad antrópica con fines urbanísticos, llegando a irrumpir su cauce natural (Figuras 33, 34 y 35).

Históricamente, durante el mes de enero-2013, estas torrenteras colmataron sus cauces provocando inundaciones que causaron severos daños a la infraestructura física de la ciudad y pérdida de vidas humanas. Debido a la

torrentera de Miraflores, el sector más afectado fue la avenida Venezuela, en el tramo comprendido entre la Calle Salaverry y el pasaje Martinetti en donde provocó la inundación de casas y la muerte de cuatro personas. Según el diario la Republica de esa fecha, la escorrentía superficial de las torrenteras que desembocaron en el río Chili, produjeron que el caudal del mismo sobrepasara el puente Tingo.



Figura 33: Torrentera de San Lázaro en las cercanías de las Avenidas Juan de La Torre y La Marina.



Figura 34: Torrentera de Mariano Melgar en las cercanías de la Av. Los Incas



Figura 35: Torrentera Miraflores en épocas de precipitaciones en las cercanías de la Av. Venezuela.

10.- GEOTÉCNIA

Los estudios geotécnicos tienen por finalidad analizar y cuantificar las características físicas de los suelos, siendo su comportamiento relevante al momento de utilizarlo como elemento de medida para el soporte de una estructura determinada (cimentaciones). Para el estudio de los suelos en la ciudad de Arequipa - Cercado se recolectó información según las siguientes técnicas:

.- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Arequipa - Cercado se construyeron 16 calicatas (Tabla 3 y Figura 36), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 4.25 metros y la mínima de 0.75 metros (ver Anexos).

Tabla 2: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	ESTE (m)	NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)
AQP_01	20922.9	8186940	2360	1.25	N.P
AQP_02	229548	8186237	2385	4.2	N.P
AQP_03	228868	8185931	2345	4.25	N.P
AQP_04	228045	8185122	2345	4.1	N.P
AQP_05	228231	8184659	2310	4	4.1
AQP_06	228316	8184128	2310	2.6	N.P
AQP_07	229330	8184232	2335	4.1	N.P
AQP_08	228773	8183834	2320	4.1	N.P
AQP_09	230283	8184498	2370	2	N.P
AQP_10	231180	8184317	2395	3.5	N.P
AQP_11	229642	8183923	2340	4.1	N.P
AQP_12	229043	8183118	2320	3	N.P
AQP_13	228957	8183392	2320	3.4	N.P
AQP_14	228293	8183547	2300	4.2	N.P
AQP_15	227815	8183821	2290	1.45	N.P
AQP_16	226301	8181718	2230	0.75	0.7

.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó el ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. En la Tabla 4 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación (ver Anexos).

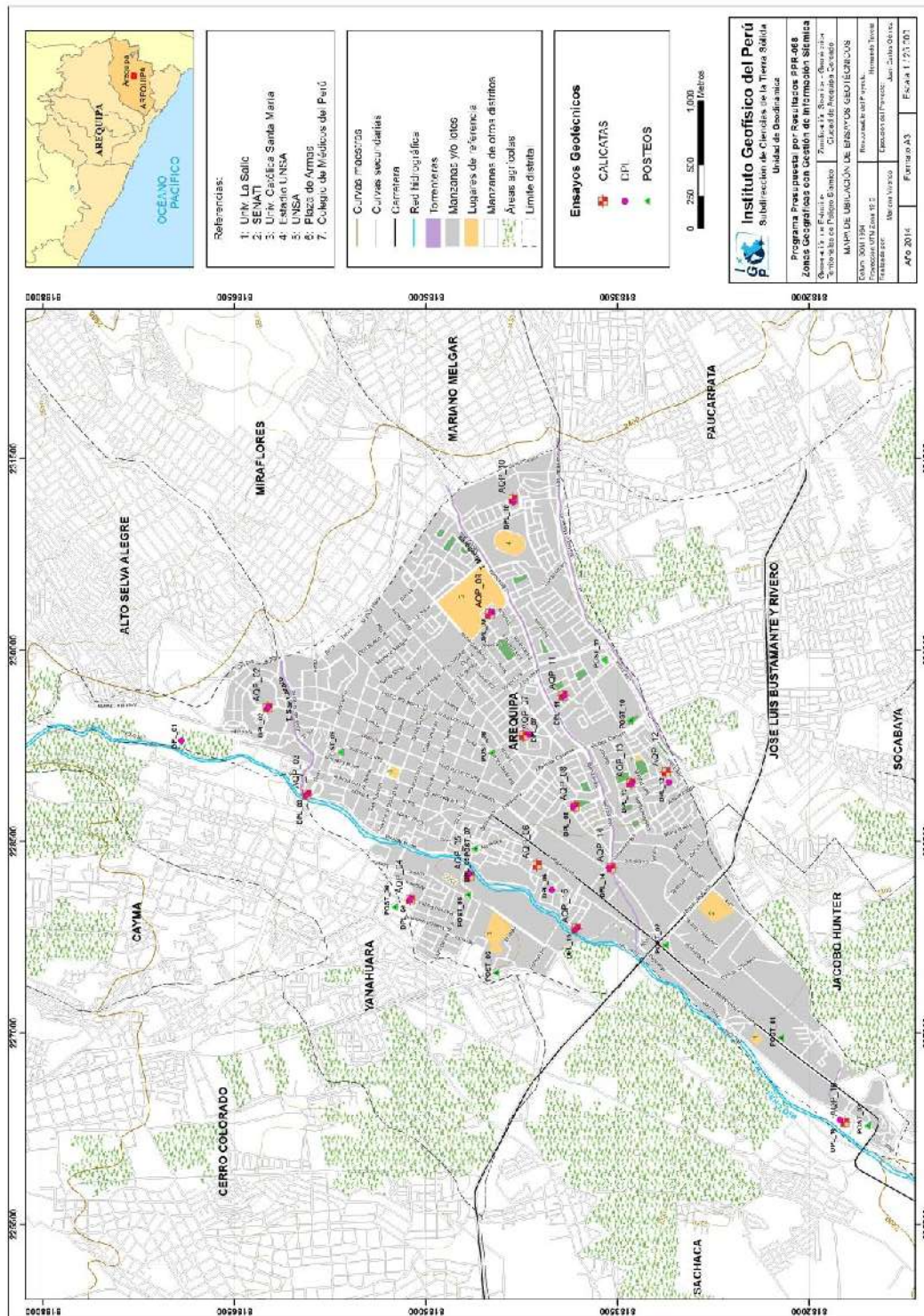


Figura 36: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Arequipa - Cercado

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 11 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 5), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 1.7 metros y la mínima de 0.3 metros (ver Anexos). Los resultados obtenidos indican que en la ciudad de Arequipa-Cercado, los suelos están conformados principalmente por gravas arenosas (ver Anexos).

Tabla 4: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas en Arequipa - Cercado

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDA (gr/cm3)	DENSIDAD SECA (gr/cm3)
AQP-01	DC-AQP-01	1.20	1.58	1.54
AQP-02	DC-AQP-02	4.20	1.65	1.57
AQP-03	DC-AQP-03	4.20	1.47	1.36
AQP-04	DC-AQP-04	4.10	1.85	1.66
AQP-05	DC-AQP-05	3.55	1.60	1.55
AQP-06	DC-AQP-06	2.00	1.73	1.65
AQP-07	DC-AQP-07	4.10	1.71	1.68
AQP-08	DC-AQP-08	4.00	1.63	1.56
AQP-09	DC-AQP-09	2.00	1.87	1.82
AQP-10	DC-AQP-10	3.50	1.49	1.39
AQP-11	DC-AQP-11	4.10	1.68	1.58
AQP-12	DC-AQP-12	3.00	1.47	1.42
AQP-13	DC-AQP-13	3.40	1.85	1.57
AQP-14	DC-AQP-14	4.10	1.45	1.36
AQP-15	DC-AQP-15	1.45	1.38	1.31
AQP-16	DC-AQP-16	0.73	1.21	0.87

Tabla 5: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en Arequipa - Cercado

POSTEO	ESTE (m)	NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
POS-01	226960	8182222	2255	0.30
POS-02	227687	8183124	2285	0.45
POS-03	226272	8181541	2225	0.30
POS-04	227986	8185246	2325	0.40
POS-05	228080	8184672	2325	0.60
POS-06	227471	8184451	2310	1.70
POS-07	228443	8184615	2310	0.80
POS-08	229192	8184488	2340	1.20
POS-09	229198	8185671	2355	0.40
POS-10	229446	8183401	2325	1.30
POS-11	229922	8183606	2345	1.30

.- **Ensayo de penetración dinámica ligera** (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 16 puntos dentro de la ciudad de Arequipa-Cercado (Tabla 6). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 2.5 metros y mínima de 0.25 metros debido a que los suelos están conformados por gravas y arenas; además de presentar ángulos de fricción promedio de 27° y 40°, propios de suelos granulares (ver Anexos).

Tabla 6: Coordenadas UTM para la ubicación y profundidad de los ensayos de penetración ligera

DPL				PROFUNDIDAD (m)
	UBICACIÓN			
	ESTE(m)	NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	
AQP_01	229289	8186915	2350	0.5
AQP_02	229548	8186237	2385	2.5
AQP_03	228868	8185931	2345	0.87
AQP_04	228045	8185122	2325	1.65
AQP_05	228245	8184663	2310	1.3
AQP_06	228119	8184012	2305	1.45
AQP_07	229340	8184188	2335	2.05
AQP_08	228778	8183844	2320	2.5
AQP_09	230291	8184490	2370	0.95
AQP_10	231160	8184314	2395	1.3
AQP_11	229641	8183917	2340	1.6
AQP_12	228964	8183096	2320	1.63
AQP_13	228952	8183390	2320	1.9
AQP_14	228295	8183561	2300	0.35
AQP_15	227815	8183821	2290	1.33
AQP_16	226320	8181756	2230	0.25

.- **Ensayo de corte directo** (Norma ASTM D3080): Para conocer la resistencia de los suelos al corte, se procedió a enviar al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina las 16 muestras extraídas de campo y los resultados se muestran en la Tabla 7. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Arequipa-Cercado no presentan cohesión; mientras que, los ángulos de fricción interna oscilan entre 36° y 37°, propios de suelos granulares como las arenas y gravas.

Tabla 7: Valores obtenidos para el ensayo de corte directo en la ciudad de Arequipa-Cercado

Muestra	Ángulo de fricción interna de suelo	Cohesión aparente del suelo	Densidad húmeda (kg/m^3)	Densidad seca	Humedad
AQP_01	37.51	0.00	1.96	-	3.80
AQP_02	37.66	0.00	1.97	-	3.10
AQP_03	37.78	0.00	1.92	-	3.50
AQP_04	37.53	0.00	1.95	-	4.10
AQP_05	37.59	0.00	1.97	-	11.00
AQP_06	37.60	0.00	1.95	-	3.10
AQP_07	36.83	0.00	1.89	-	2.90
AQP_08	37.77	0.00	1.97	-	2.80
AQP_09	37.51	0.00	1.99	-	2.50
AQP_10	36.82	0.00	1.92	-	4.20
AQP_11	37.59	0.00	1.97	-	4.50
AQP_12	37.60	0.00	1.96	-	3.50
AQP_13	37.19	0.00	1.89	-	4.20
AQP_14	37.53	0.00	1.93	-	4.50
AQP_15	37.27	0.00	1.96	-	3.80
AQP_16	37.13	0.00	1.95	-	16.00

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad de carga admisible. De los ensayos de corte directo se hace uso los datos del ángulo de fricción y la cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3 definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Arequipa - Cercado, los valores de capacidad de carga fueron calculados para una profundidad de cimentación de 1.2 metros y ancho mínimo de cimentación de 1 metro. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8 y en la Figura 37, el mapa de capacidad portante del suelo en la ciudad de Arequipa – Cercado.

Según los resultados obtenidos, la ciudad de Arequipa-Cercado se asienta sobre suelos con capacidad portante alta ($>3 \text{ km}/\text{cm}^2$), registrándose el máximo en la Calle San Javier (extremo NE de la plaza de Armas, Calicata 8) con valores de $5.02 \text{ km}/\text{cm}^2$.

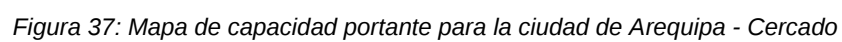
Tabla 8: Valores de la capacidad de carga admisible para la ciudad de Arequipa – Cercado y rangos establecidos para la clasificación de suelos

Muestra	Capacidad de carga última (tn/m²)	Capacidad de carga admisible
AQP_01	192.33	4.81
AQP_02	197.65	4.94
AQP_03	196.02	4.90
AQP_04	191.93	4.80
AQP_05	195.62	4.89
AQP_06	193.92	4.85
AQP_07	167.40	4.19
AQP_08	200.82	5.02
AQP_09	195.27	4.88
AQP_10	169.81	4.25
AQP_11	195.62	4.89
AQP_12	194.63	4.87
AQP_13	176.61	4.42
AQP_14	189.97	4.75
AQP_15	185.45	4.64
AQP_16	97.20	3.24

Capacidad de Carga Admisible Kg/cm²	DENOMINACIÓN
<1.0	Muy Baja
1.0 – 2.0	Baja
2.0 – 3.0	Media
>3.0	Alta

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Arequipa-Cercado. Se ha identificado la existencia de 3 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 38):



.- Suelos tipo GW: Están conformados por gravas bien graduadas con presencia de arenas y limos. Estos suelos presentan contenidos de humedad de 2.80% (calicata 8), 2.50% (calicata 9) y 16% (calicata 16), este último debido a que los suelos presentan humedad alta debido a que el nivel freático superficial está a una profundidad de 0.70 metros. No presentan límite plástico y son considerados como suelos compactos. Su capacidad de carga varía entre 3.24 a 5.02 Kg/cm². Estos suelos abarcan el 15% de la superficie de la ciudad de Arequipa-Cercado, principalmente en las urbanizaciones de La Perla, Ferroviarios y Tingo.

.- Suelos tipo GP: Suelos conformados por gravas arenosas mal gradadas. Los materiales granulares superan el 65% en promedio; mientras que, los finos no superan el 34%. En estos suelos el contenido de humedad varía de 3.10% a 11.00%, siendo este último alto debido a que el nivel freático superficial está a 4.00 metros. Son considerados como suelos compactos y no presenta plasticidad. Su capacidad de carga admisible varía de 4.85 a 4.90 Kg/cm², y están presentes en la mayor parte de la superficie del área urbana, desde el lado Noreste (Selva Alegre) hasta el Sureste de la ciudad de Arequipa - Cercado, llegando a ocupar el 70 % de los suelos de la ciudad.

.- Suelos tipo SW: Conformados por arenas bien graduadas con presencia de limos y gravas. El porcentaje de humedad es variada en 2.90% (calicata 7), 4.20% (calicata 10), 4.20% (calicata 13) y 4.50% (calicata 14). Son suelos poco compactos y sin plasticidad. Su capacidad de carga varía entre 4.19 a 4.75 Kg/cm². Estos suelos abarcan el 15% de la ciudad de Arequipa - Cercado, principalmente en los sectores del Estadio Melgar, Castelar, Estadio UNSA y SIDSUR..

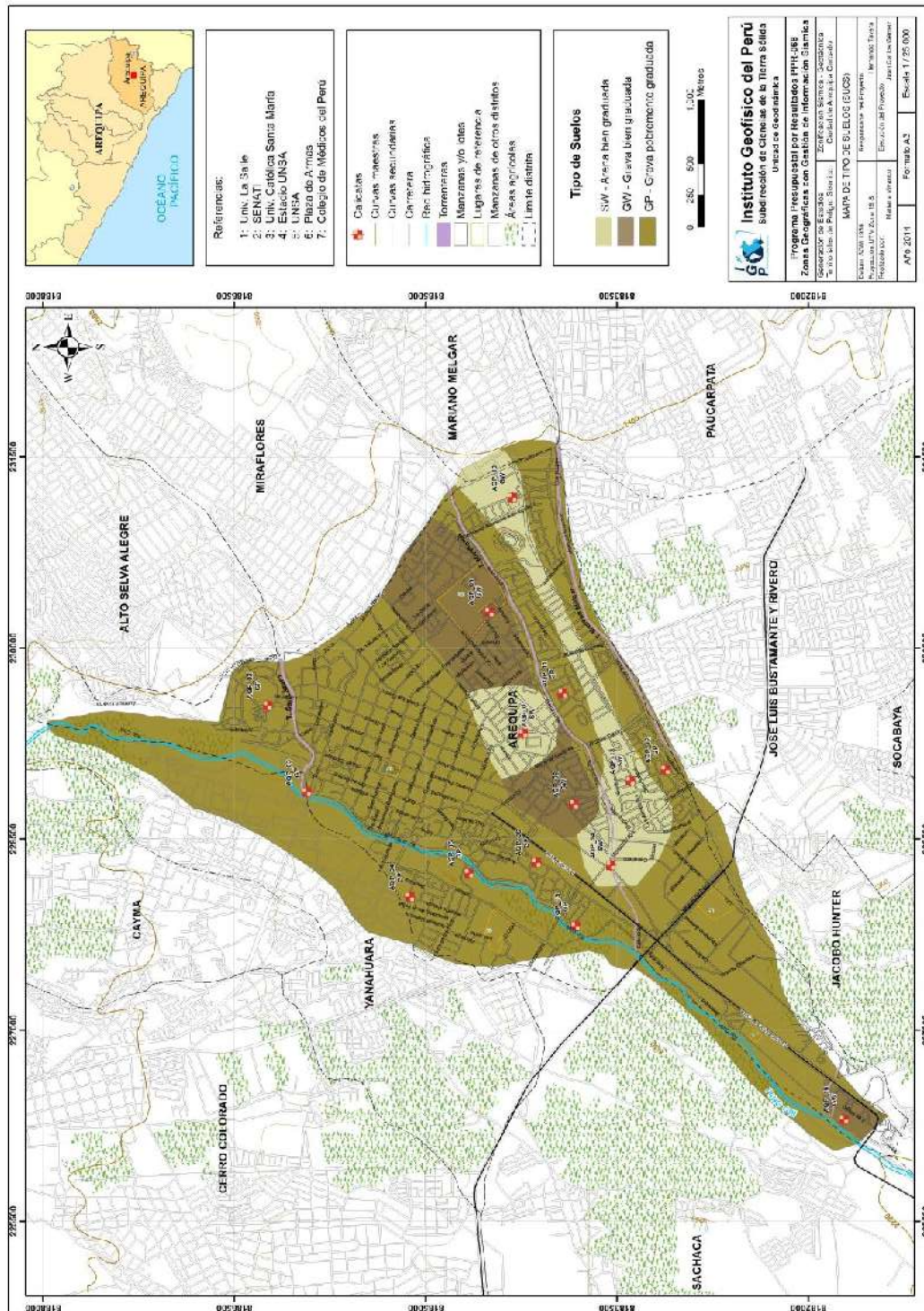


Figura 38: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Arequipa - Cercado

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

En este estudio se ha realizado la aplicación de los siguientes métodos sísmicos y geofísicos: razones espectrales (H/V), arreglos lineales (MASW) y tomografía eléctrica. Todos tienen como principal objetivo conocer las propiedades físicas del subsuelo (periodos dominantes, velocidades sísmicas, resistividades del subsuelo, etc.) a efectos de lograr su caracterización geofísica. A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos para la ciudad de Arequipa - Camaná.

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Arequipa-Cercado, a definir la distribución y el número de puntos para el registro de vibraciones ambientales teniendo en cuenta la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio. En la Figura 39 se muestra la distribución espacial de los 322 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 15 minutos, lo cual permite disponer de buena cantidad de información para su posterior análisis.

Esta información permite obtener espectros de Fourier para las tres componentes de registro y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), conocer las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del suelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa. En la Figura 40 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto AQ-302. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 15 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes entre 1.0 y 7.9 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que la energía se irradia en dirección este-oeste. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

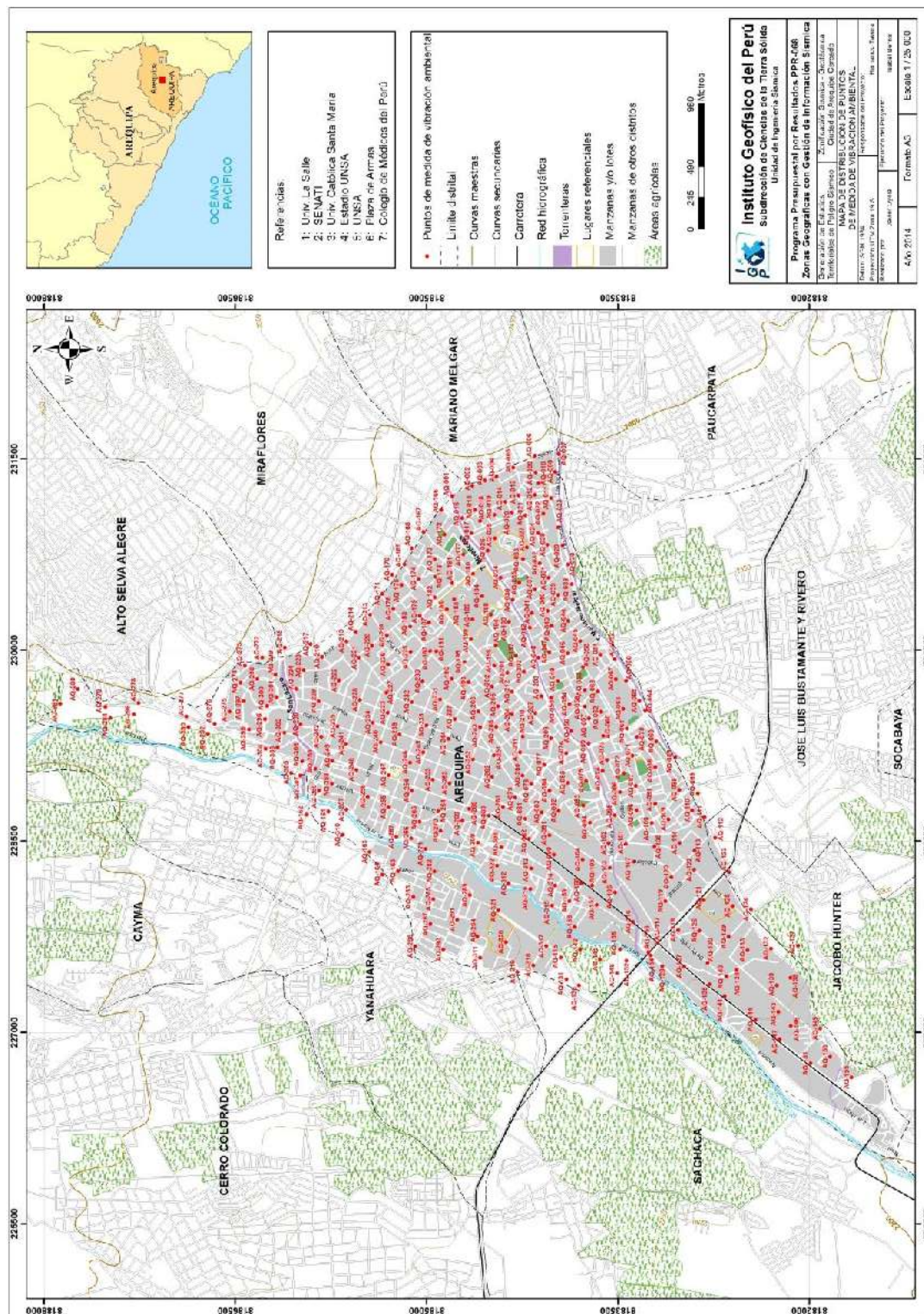


Figura 39: Mapa de la ciudad de Arequipa - Cercado y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

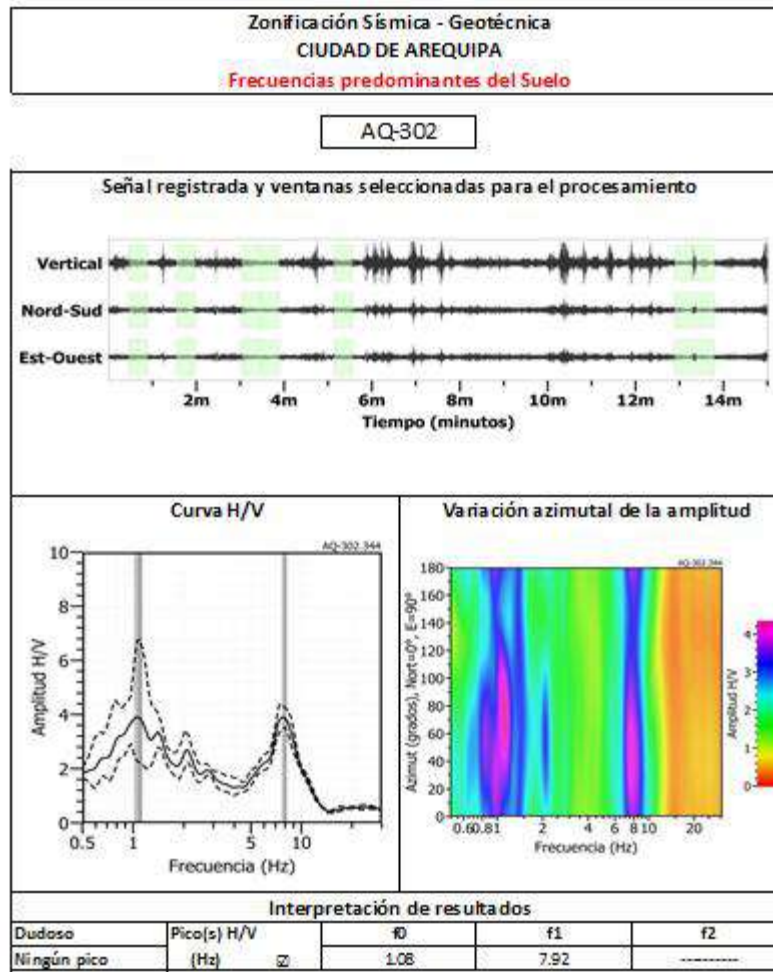


Figura 40: Ejemplo de la ficha H/V para el punto AQ-302 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

.- Distribución de frecuencias predominantes: A partir de los valores extraídos de las razones espectrales H/V, se obtiene mapas con la distribución espacial de los valores de frecuencias predominantes. Los resultados muestran que valores similares para las frecuencias predominantes se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere del análisis detallado para comprender su comportamiento dinámico.

En general, para el análisis de la información se debe considerar los siguientes aspectos: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia

de depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (Bernal, 2006).

La información obtenida de las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis tres rangos de frecuencia: Fo ($F < 1.8$ Hz), F1 ($1.80 \geq F \leq 10$ Hz) y F2 ($F > 10$ Hz), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Arequipa-Cercado.

.- Frecuencias predominantes Fo: Según la Figura 41, las frecuencias predominantes fluctúan entre 0.8 y 1.8 Hz, y se distribuyen de manera uniforme hacia los extremos SE y NE de la ciudad, y de manera dispersa en la zona céntrica de la ciudad. El origen de estas frecuencias bajas será analizado posteriormente en razón que es probable que ellas estén asociadas al comportamiento dinámico de las estructuras existentes en la ciudad.

En la Figura 42, se muestra ejemplos de razones espectrales que caracterizan a este rango de frecuencias y corresponden a los puntos AQ-12, AQ-21, AQ-28, AQ-61, AQ-64 y AQ-256, los tres primeros ubicados en el extremo Este de la ciudad y los siguientes en el extremo sur y centro de la ciudad. En estos gráficos sobresalen valores bajos de frecuencia (0.8 y 0.9 Hz) con amplificaciones de hasta 5 veces, además se tiene picos secundarios a diferentes frecuencias y con amplitudes variadas.

.- Frecuencias predominantes F1: Según la Figura 43, este rango de frecuencias define la presencia de dos áreas con valores similares. La primera considera el área céntrica de la ciudad, sobre la Plaza de Armas y alrededores, con el predominio de frecuencias de 4.0 a 10 Hz, y con tendencia a disminuir conforme se avanza hacia el extremo Norte, en donde predominan valores de 3.0 Hz. La segunda área abarca el extremo Este de la ciudad con valores entre 1.8 y 3.0 Hz. Asimismo, en el extremo SO del área de estudio (alrededor del estadio de la Universidad San Agustín), este rango de frecuencias se distribuye de manera dispersa.

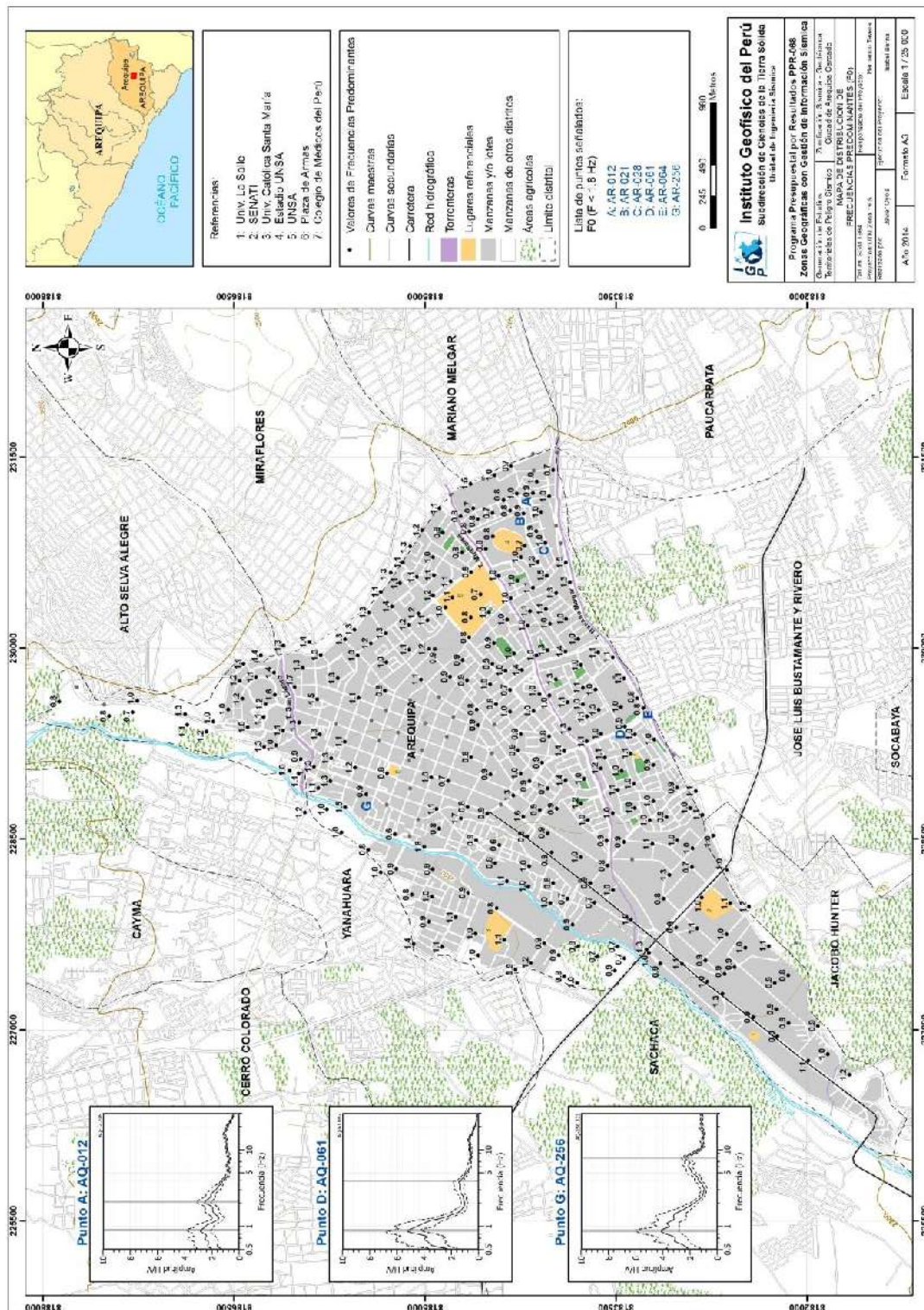
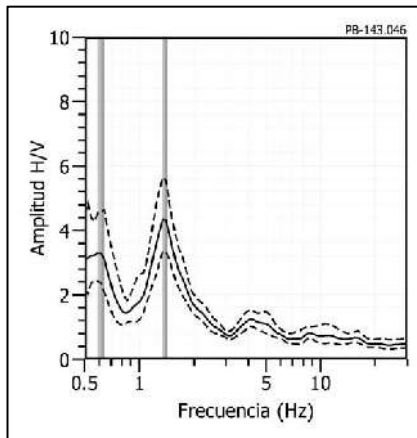
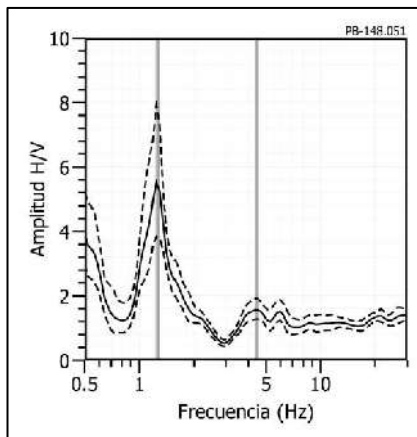


Figura 41: Mapa de la ciudad de Arequipa-Cercado y distribución espacial de las frecuencias predominantes **F₀** ($F < 1.8$ Hz).

AQ - 12



AQ - 21



AQ - 28

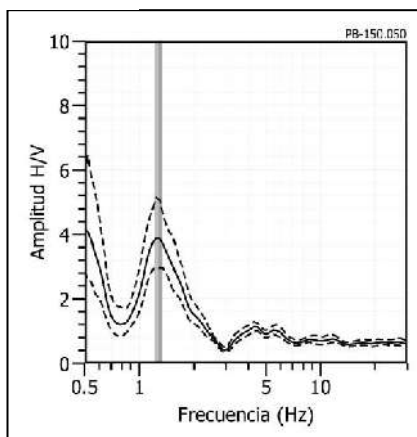
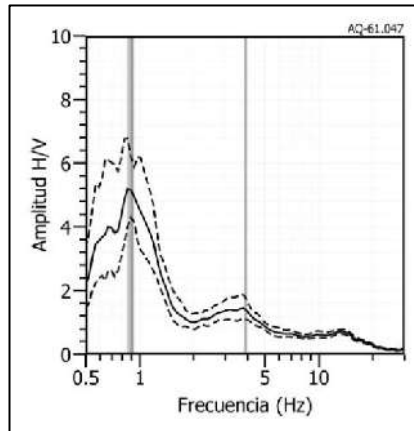
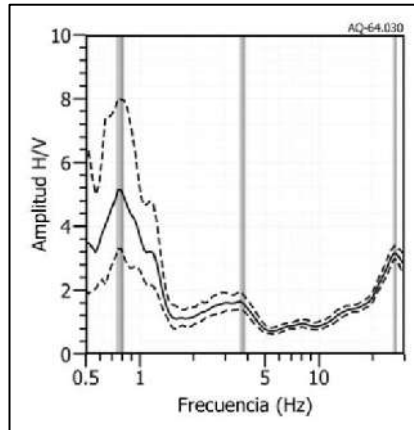


Figura 42: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 1.8$ Hz): puntos AQ-12, AQ-21 y AQ-28, todos ubicados en el extremo Este de la ciudad. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 61



AQ - 64



AQ - 256

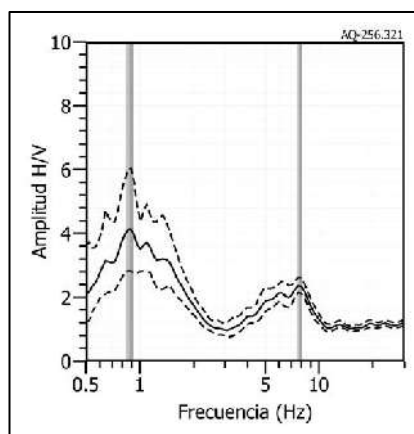


Figura 42: Continuación.../. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 1.8$ Hz): puntos AQ-61, AQ-64 y AQ-256, ubicados los dos primeros en el extremo sur de la ciudad y el último en el área céntrica.

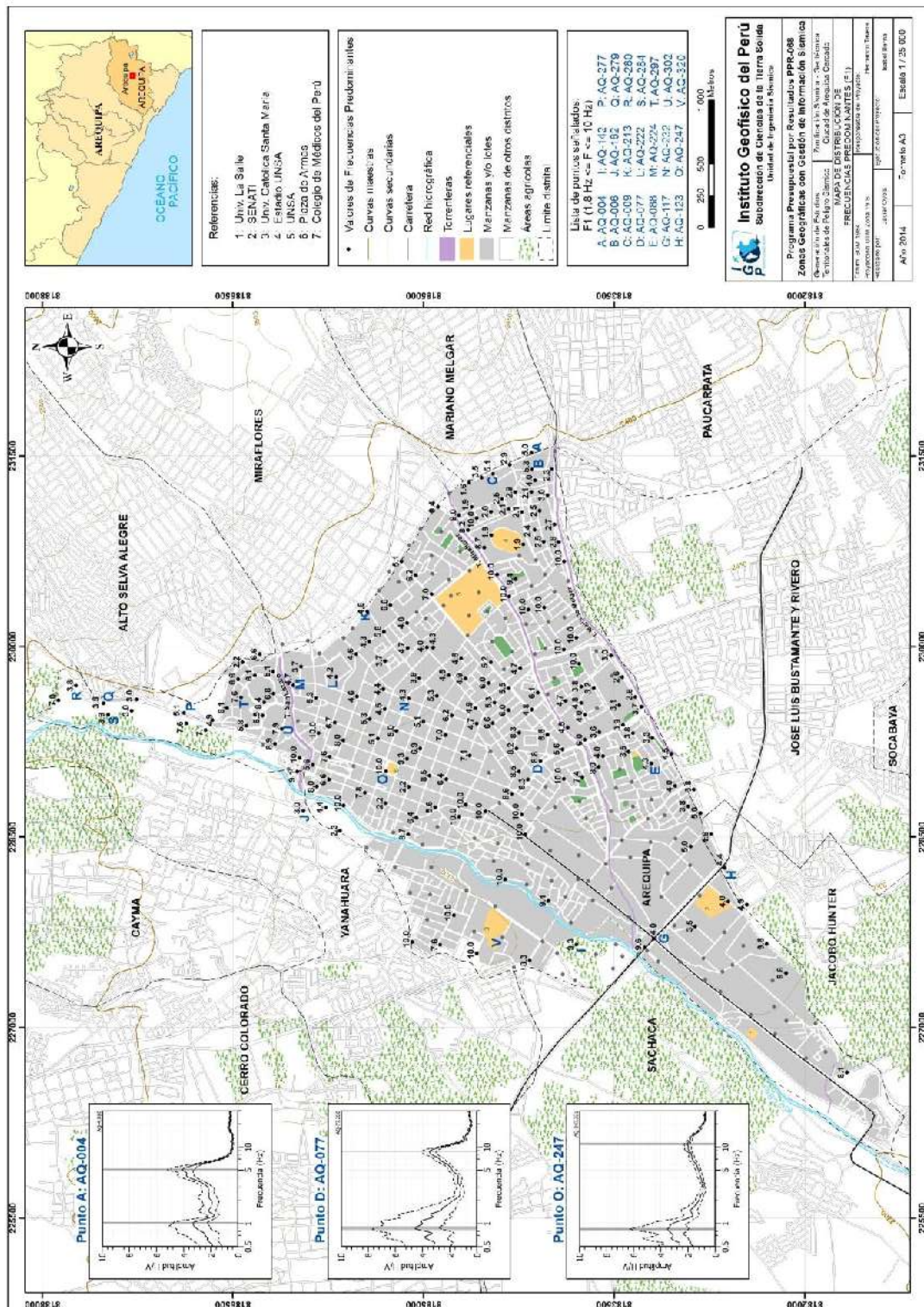


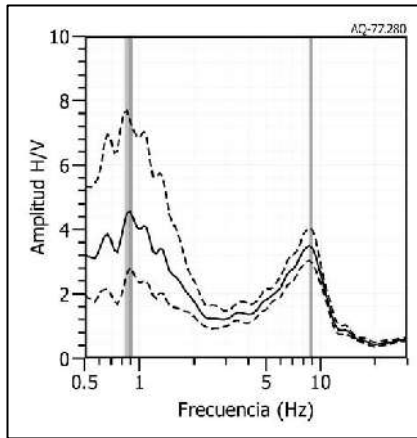
Figura 43: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ($1.8 \geq F \leq 10.0 \text{ Hz}$).

En la Figura 44, se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos AQ-77, AQ-232 y AQ-247, ubicados próximos a la Plaza de Armas de la ciudad con el predominio de picos de frecuencias a 8.8, 4.2 y 10.0 Hz, con amplificaciones máximas relativas entre 2.0 y 3.4 veces. En los puntos AQ-142, AQ-162 y AQ-320 ubicados en la margen derecha del río Chili, predominan frecuencias mayores a 9 Hz, con amplificaciones de hasta 7 veces y con menor amplitud, en el punto AQ-162 para una frecuencia a 3 Hz.

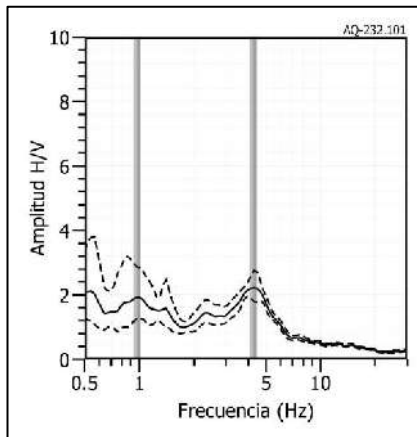
Para el extremo Norte de la ciudad se muestra ejemplos de razones espectrales para los puntos AQ-279, AQ-280 y AQ-284, todos ubicados en las cercanías de la Avenida Chilina con frecuencias predominantes entre 3.5 a 3.9 Hz y amplificaciones de hasta 3 veces. Conforme se tiende hacia el centro, los valores de amplificación se incrementan, tal como se puede observar en las razones espectrales obtenidas para los puntos AQ-277, AQ-297 y AQ-302, todos próximos al parque recreacional de Selva Alegre, donde predominan frecuencias entre 5.1 y 7.9 Hz con amplificaciones de hasta 3.8 veces. Para el extremo NE, se considera como ejemplos los puntos AQ-213, AQ-222 y AQ-224 con el predominio de frecuencias a 4.2 y 4.6 Hz con amplificaciones de hasta 2.1 veces.

Para el extremo Sur de la ciudad, se muestra las razones espectrales para los puntos AQ-88, AQ-117 y AQ-123, todos ubicados próximos a la Panamericana Sur y en donde predominan picos de frecuencias de 4.0 y 4.3 Hz con amplificaciones de hasta 2.6 veces. Hacia el extremo Este del área de estudio, próximo al Estadio de la Universidad San Agustín, se ubican los puntos AQ-12, AQ-21 y AQ-28 (Figura anterior), con razones espectrales que muestran picos predominantes con valores entre 2.0 y 2.5 Hz, y amplificaciones de hasta 2.9 veces. Entorno a estos, en los puntos AQ-04, AQ-06 y AQ-09 se observa frecuencias predominantes entre 4.9 y 5.3 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces. En general, estas variaciones en los valores de frecuencias predominantes evidencian cambios próximos en la respuesta dinámica de estos suelos.

AQ - 77



AQ - 232



AQ - 247

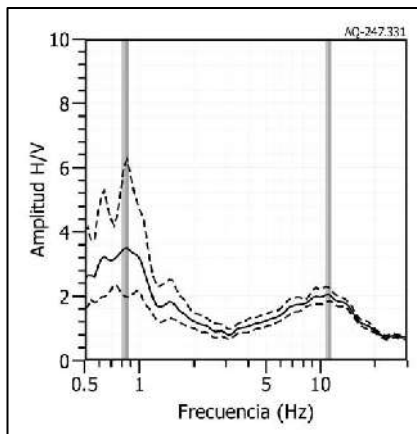
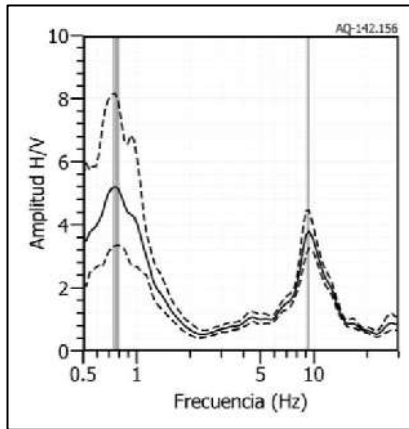
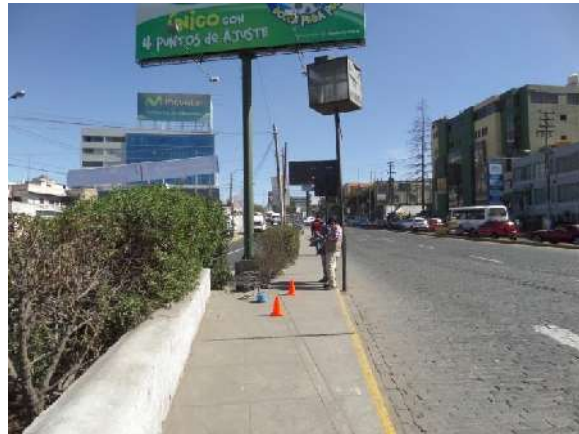
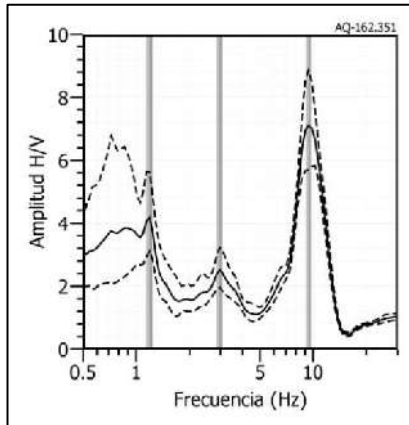


Figura 44: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-77, AQ-232 y AQ-247, todos distribuidos en las cercanías de la Plaza de Armas de la ciudad.. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 142



AQ - 162



AQ - 320

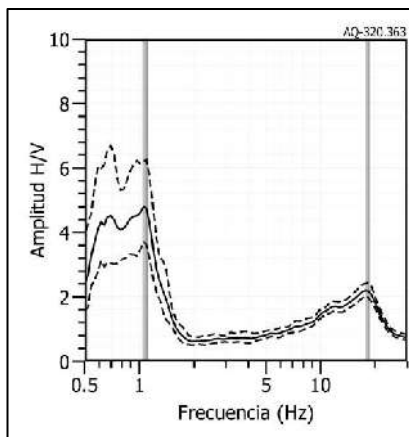
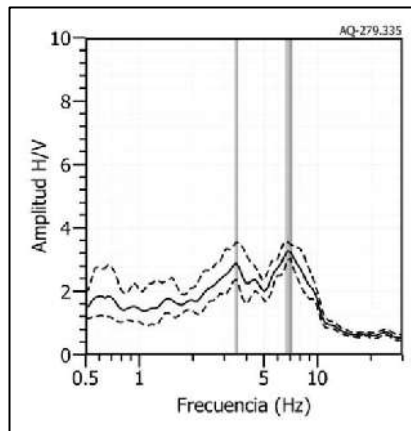
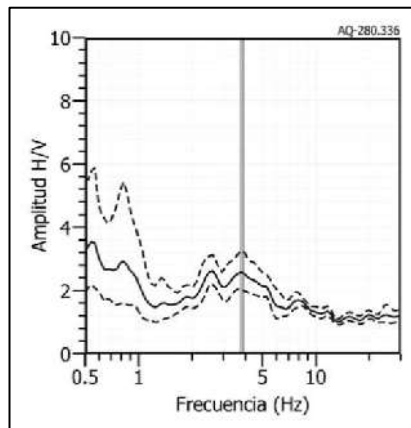


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-142, AQ-162 y AQ-320, todos ubicados en la margen derecha del río Chili.: Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 279



AQ - 280



AQ - 284

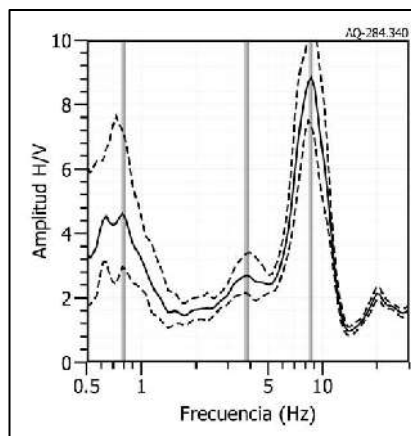
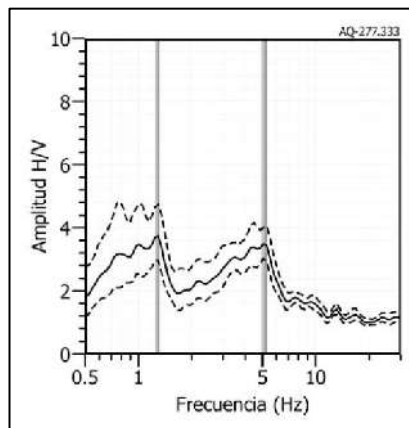
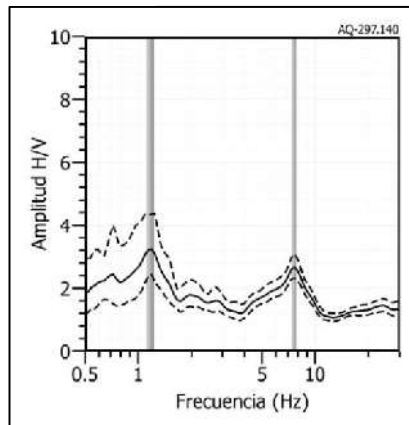


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-279, AQ-280 y AQ-284 ubicados en las cercanías de la Av. Chilina. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 277



AQ - 297



AQ - 302

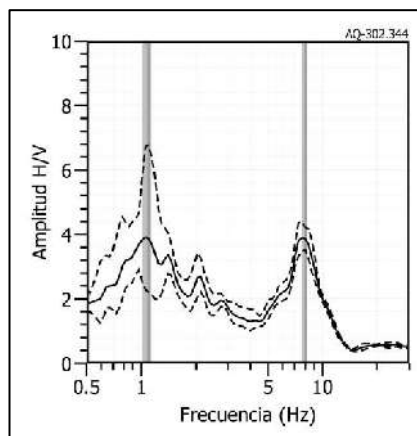
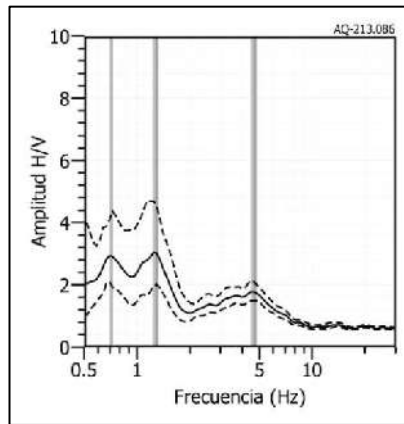
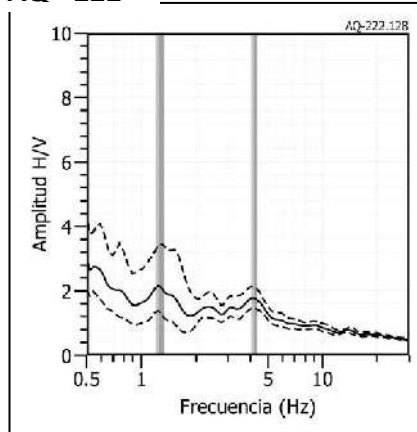


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-277, AQ-297 y AQ-302 ubicados en las proximidades del Parque Selva Alegre. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 213



AQ - 222



AQ - 224

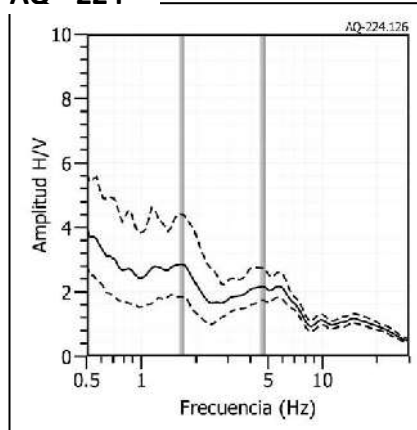
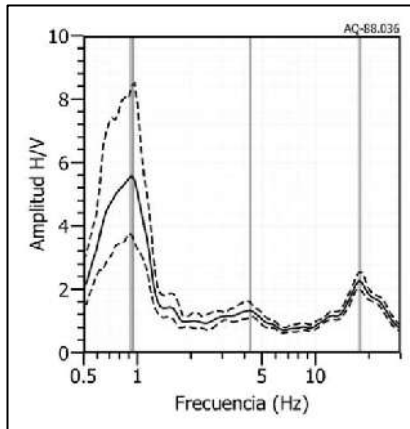
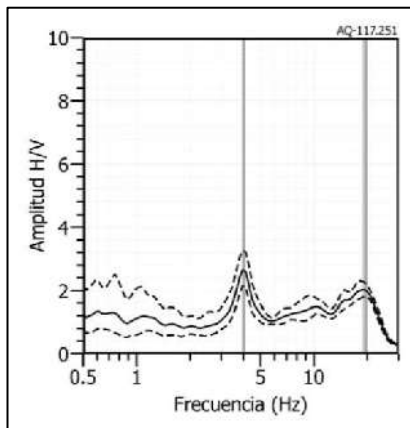


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango $F1$ ($1.8 \geq F \leq 10.0 \text{ Hz}$) para los puntos AQ-213, AQ-222 y AQ-224 ubicados en el extremo NE del área de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 88



AQ - 117



AQ - 123

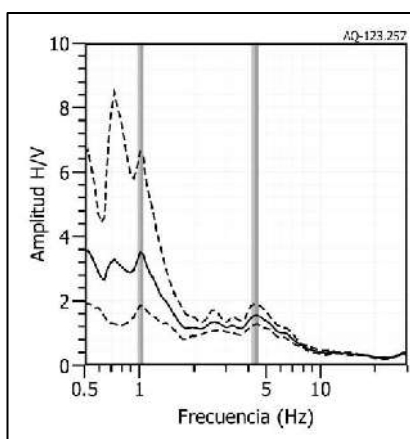
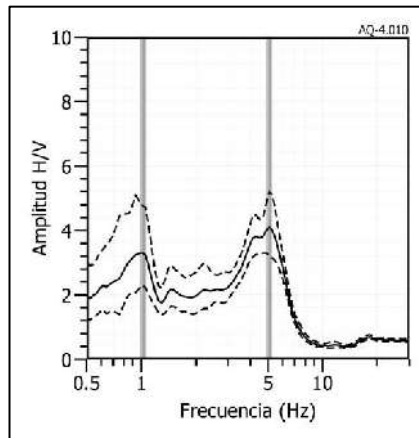
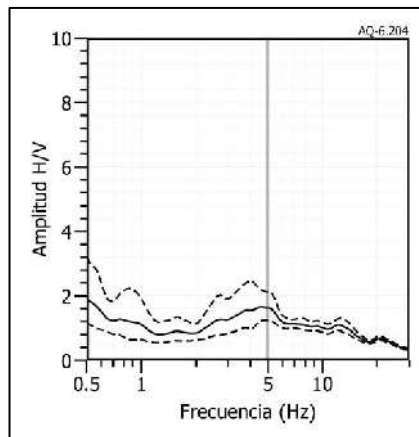


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-88, AQ-117 y AQ-123 ubicados en las cercanías de la Panamericana Sur. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

AQ - 04



AQ - 06



AQ - 09

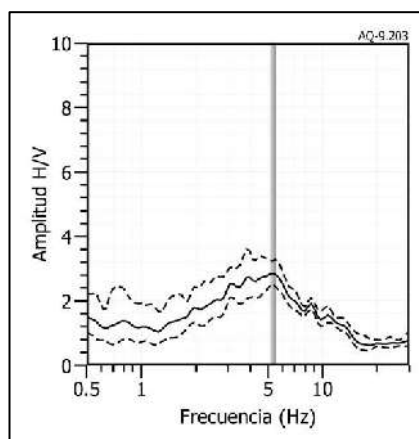


Figura 44: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($1.8 \leq F \leq 10.0$ Hz) para los puntos AQ-4, AQ-6 y AQ-9 ubicados en las proximidades del estadio de la Universidad San Agustín. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

.- Frecuencias predominantes F2 ($F > 10\text{Hz}$): Estas frecuencias se presentan principalmente en los puntos ubicados hacia el extremo SO de la zona de estudio con valores que fluctúan entre 10 y 20 Hz, y con amplificaciones de hasta 5 veces en algunos puntos (Figura 45). Estos valores evidencian la presencia de suelos poco compactos como rellenos, desmontes y/o áreas de cultivo.

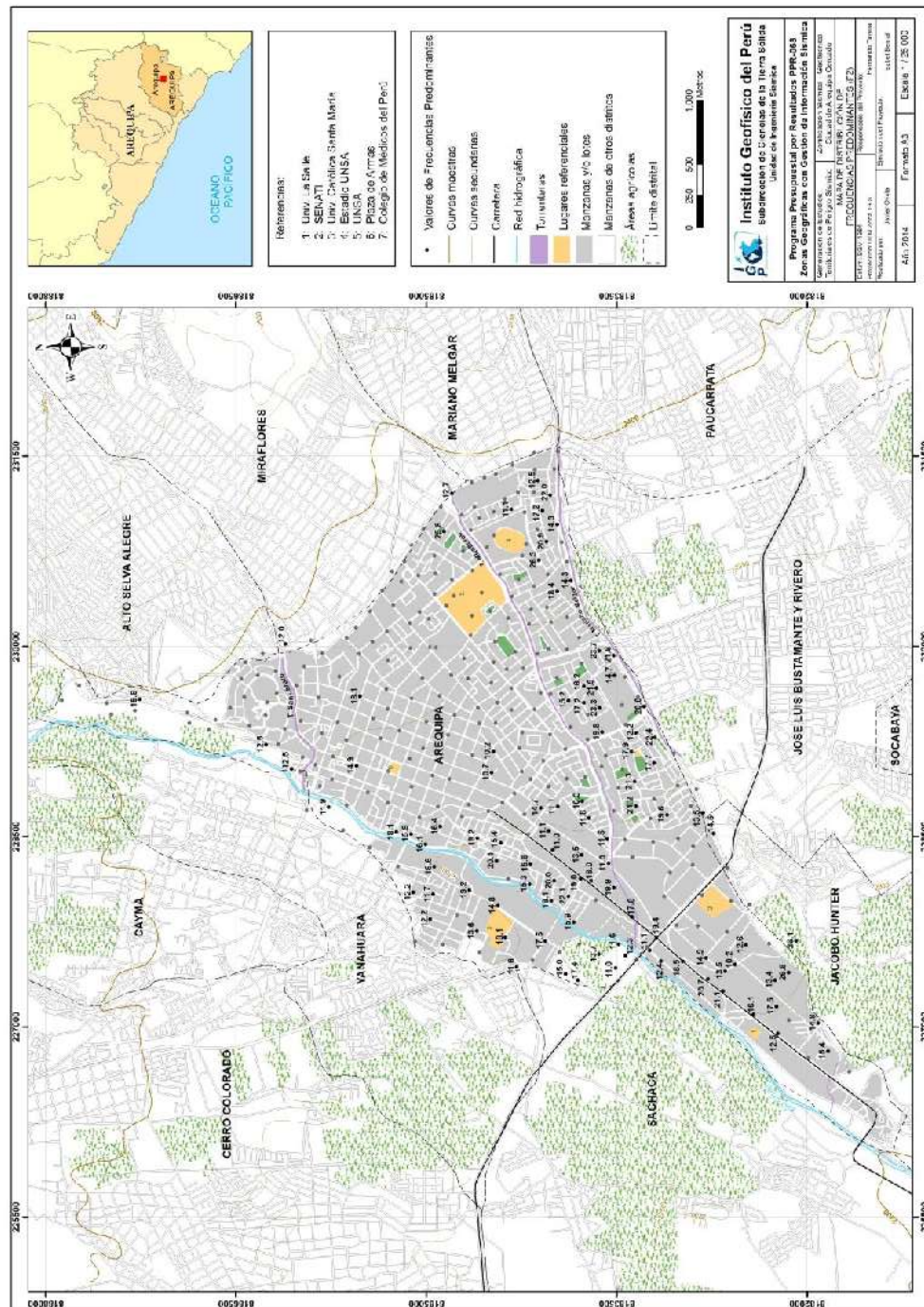


Figura 45: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F2 (F>10Hz).

11.3.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

La técnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) permite conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales registradas por arreglos lineales de estaciones sísmicas. Como resultado de la inversión de la curva de dispersión, se obtiene el perfil de velocidades para las ondas de corte (V_s) en el punto central de cada arreglo.

Para el registro de información se ha utilizado un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24-canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 110 dB. Como fuente de impacto y/o energía para generar las ondas sísmicas, se utilizó un martillo de 20 lbs. Los parámetros de registro, tales como la geometría del tendido, espaciamiento entre geófonos (entre 3 y 6 metros) y el punto de impacto del martillo, fue variable ya que dependió de la geomorfología de la zona de estudio. La frecuencia de muestreo fue de 4000 Hz con un pre-trigger de -0.1s y una longitud de registro de 2 segundos. Para eliminar el registro de ruido de fondo se realizaron entre 6 y 12 golpes en cada punto de disparo, permitiendo el estaqueo temporal de los datos y así, aumentar la coherencia en los resultados.

En la Figura 46, se presenta el mapa de la ciudad de Arequipa - Cercado con la distribución espacial de 10 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AQ..., LS10-AQ. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se considera la clasificación, que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte (V_s):

- .- Rocas duras, velocidades $V_s > 1,500$ m/s*
- .- Rocas moderadamente duras, velocidades V_s de 800 a 1500 m/s*
- .- Suelo muy duro o roca blanda, velocidades V_s de 500 a 800 m/s*
- .- Suelo duro, velocidades V_s de 180 a 500 m/s*
- .- Suelo blando, velocidades $V_s < 180$ m/s*
- .- Suelo excepcionalmente blando (S4) (condiciones excepcionales)*

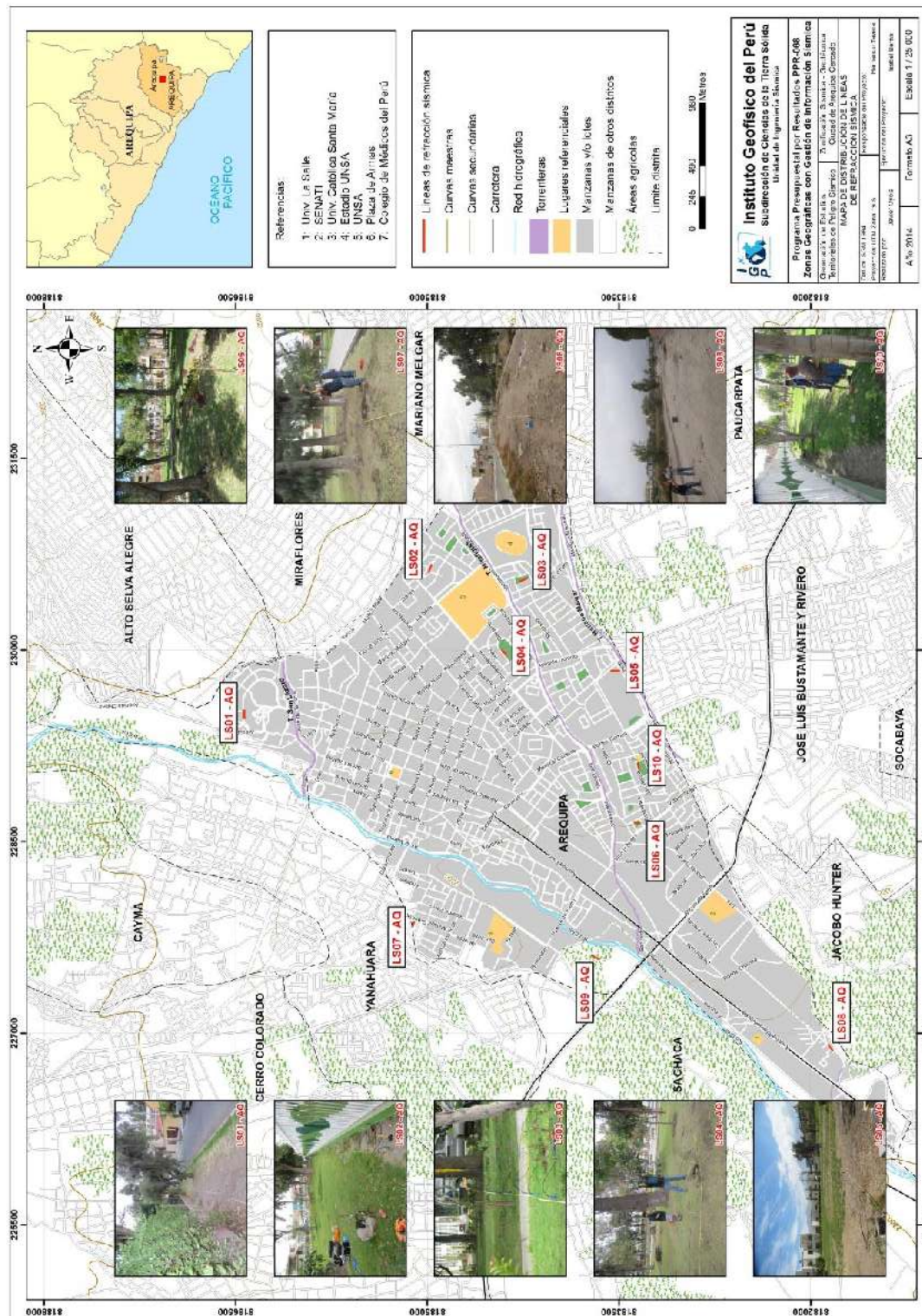


Figura 46: Mapa de la ciudad de Arequipa-Cercado y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-AQ, ..., LS10-AQ.

A continuación, se describe las características de cada uno de los perfiles sísmicos construidos para conocer la velocidad de las ondas de corte (V_s) en la ciudad de Arequipa - Cercado (Figura 47).

Arreglo Lineal LS01- AQ: El arreglo se realizó en el extremo Norte de la ciudad, sobre la Av. M. Benavides, al costado del Parque Selva Alegre. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por una capa superficial de poco espesor y baja velocidad, asentada sobre una capa con espesor de 12 metros y velocidades V_s de 380 m/s correspondientes a suelos blandos a duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 1000 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras.

Arreglo Lineal LS02- AQ: El arreglo se realizó en el extremo NE de la ciudad, sobre el parque Hipólito Únanse ubicado en la Urb. Victoria próximo a la Universidad San Agustín. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 1.5 metros y velocidades V_s de 160 m/s correspondiendo a suelos blandos. La segunda capa presenta un espesor de 5 metros con velocidades V_s de 330 m/s correspondiente a suelos blandos a duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 500 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras.

Arreglo Lineal LS03- AQ, LS04-AQ y LS05-AQ: Los arreglos se realizaron en el extremo Este de la ciudad, próximos al estadio de la Universidad San Agustín, entre la Av. Paucarpata, el Coliseo Independencia de Arequipa y en IREN de Arequipa respectivamente. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 2 metros y velocidades V_s de 170 m/s. La segunda capa presenta espesores entre 4 y 6 metros y velocidades V_s entre 340 m/s y 380m/s correspondientes a suelos blandos a duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 520 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras.

Arreglos Lineales LS06-AQ y LS10-AQ: Los arreglos se realizaron en el extremo SE de la ciudad, el primero próximo a la intersección entre las Avenidas Vidaurrázaga y Manzanitos; y el segundo próximo al Colegio Médico del Perú (parque Los Ángeles). Los resultados muestran la presencia de suelos

conformados por tres capas, la primera con espesores alrededor de los 2 metros y velocidades V_s de entre 150 y 200 m/s. La segunda capa presenta espesores entre 5 y 7 metros, y velocidades V_s de entre 300 m/s y 400 m/s correspondiente a suelos blandos a duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 600 m/s y corresponde a suelos muy duros.

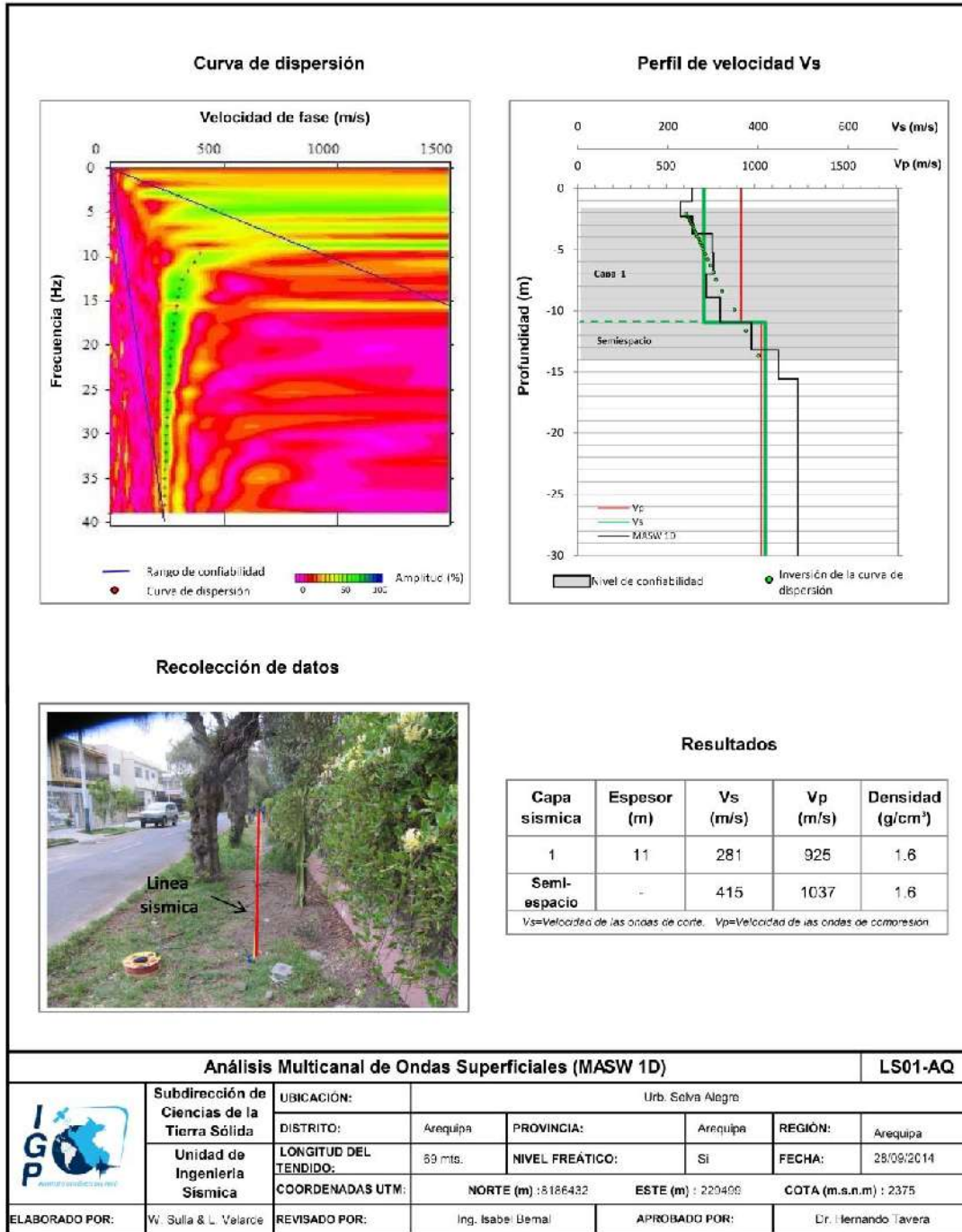


Figura 47: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS01-AQ.

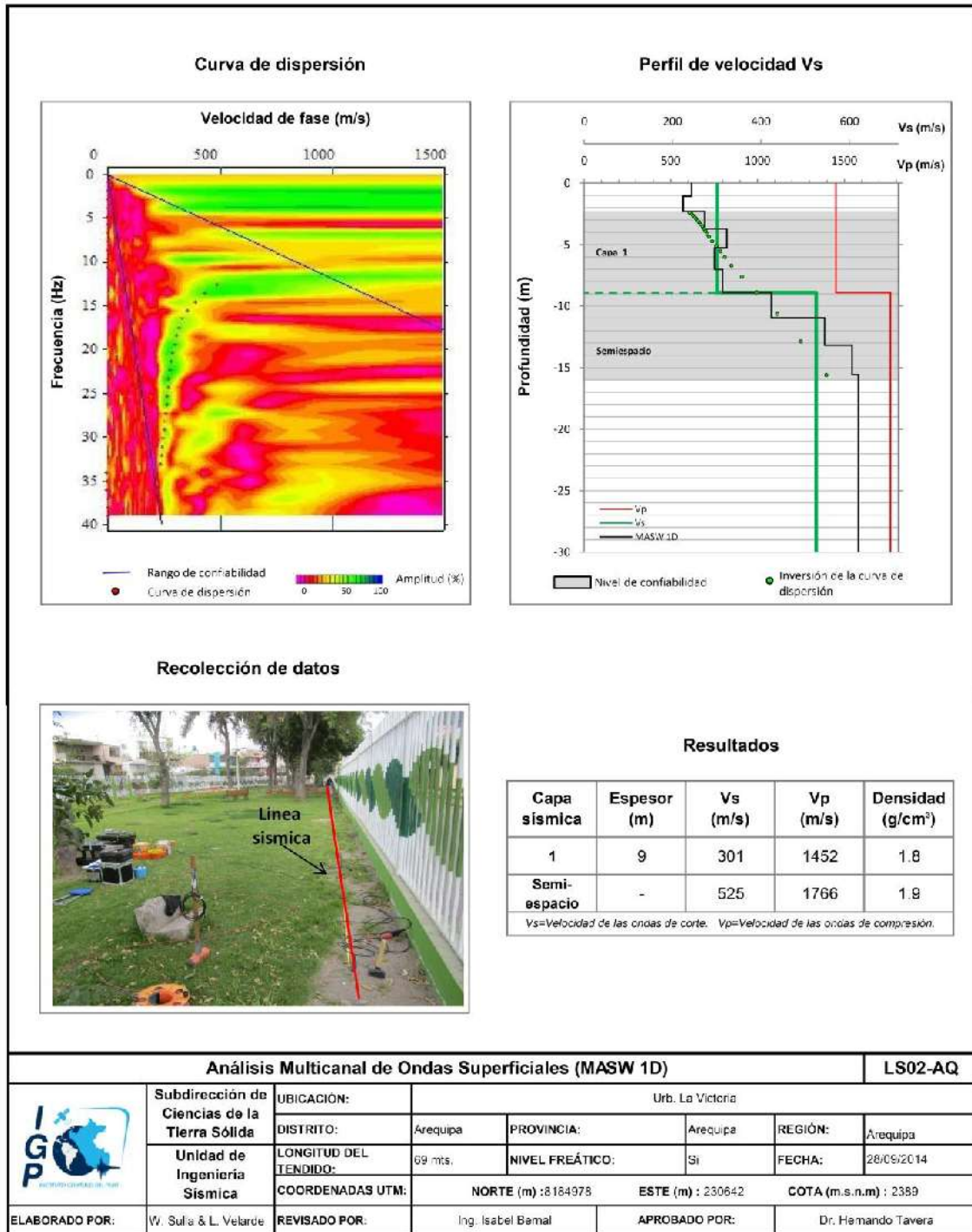


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS02-AQ.

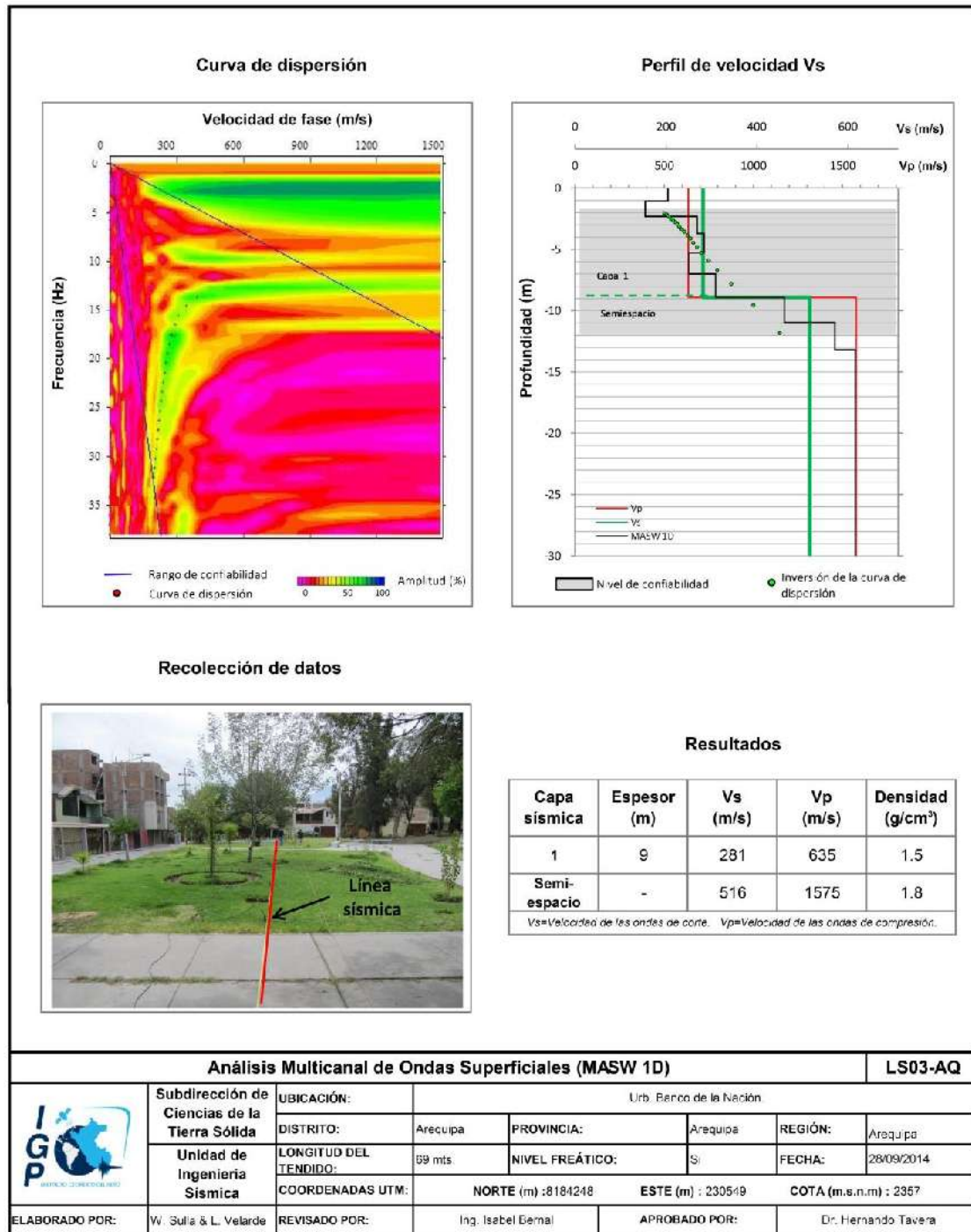


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS03-AQ.

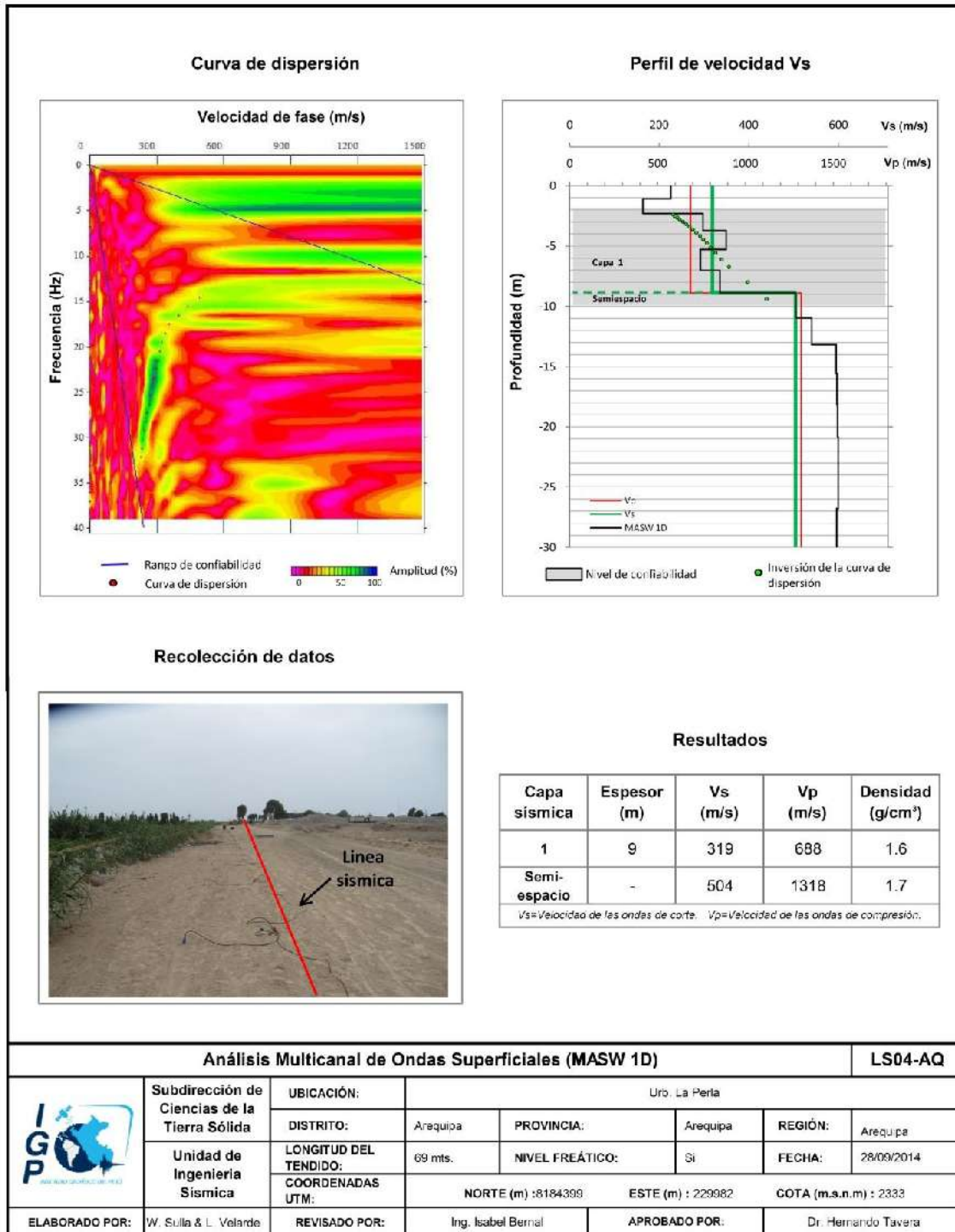


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS04-AQ.

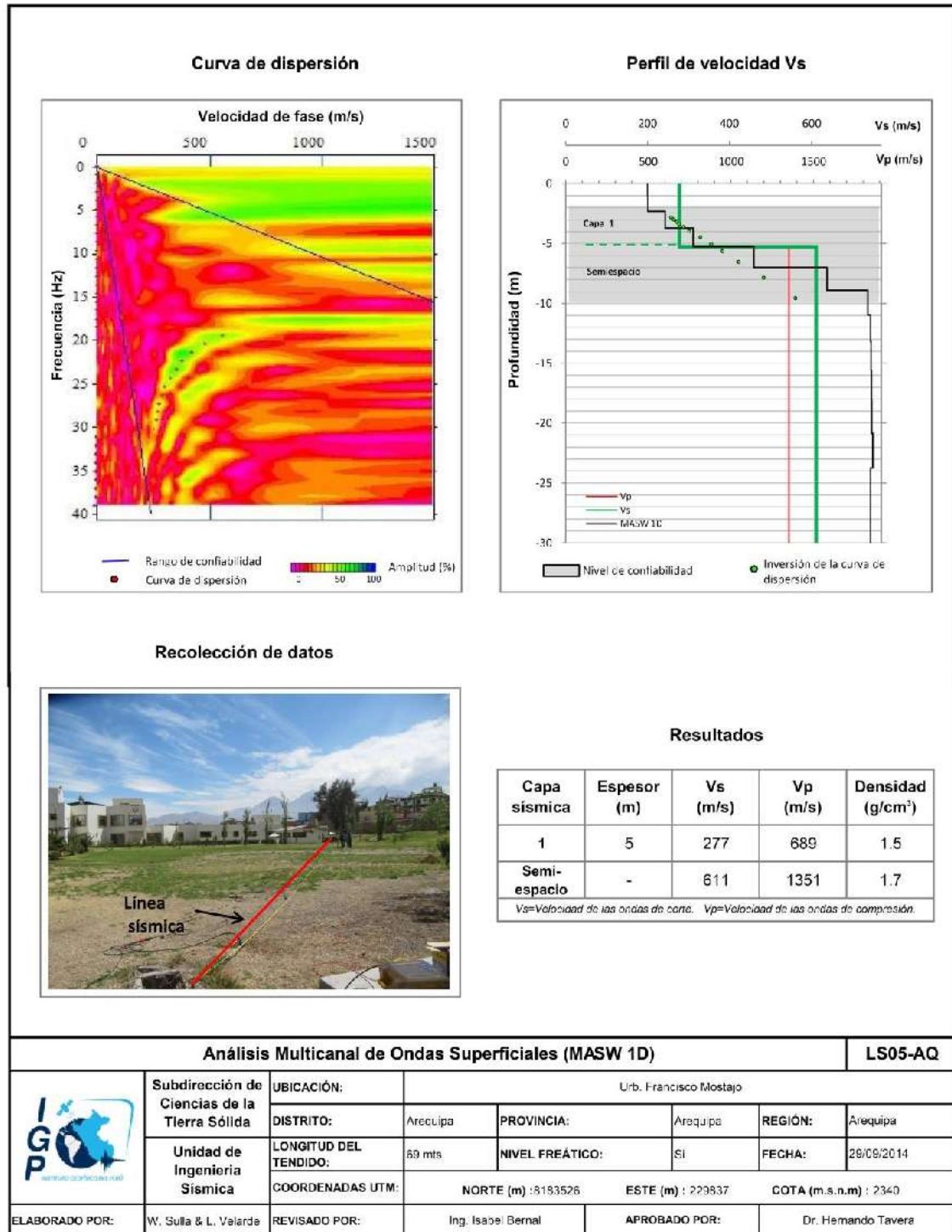


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS05-AQ.

Arreglos Lineales LS07-AQ: El arreglo se realizó en el extremo NO de la ciudad, sobre el Parque Víctor Andrés Belaunde (denominado parque del Maestro). Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con espesores de 1 metros y velocidades V_s de 160 m/s. La segunda capa presenta espesores de 6 metros y velocidades V_s de 300 m/s. Ambas velocidades de V_s sugieren la presencia de suelos blandos a duros. La interface con la siguiente capa presenta velocidades V_s de 620 m/s correspondiendo a suelos muy duros.

Arreglos Lineales LS08-AQ y LS9-AQ: Los arreglos se realizaron en el extremo Sur de la ciudad: el primero en la margen derecha del río Chili y el segundo próximo a la Torrentera de Mariano Melgar (cerca al Club de Abogados). Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con espesores alrededor de 1.5 metros y velocidades V_s entre 170 y 200 m/s respectivamente. La segunda capa presenta espesores entre 4 y 5 metros y velocidades V_s entre 320 m/s y 380 m/s correspondientes a suelos blandos a duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 700 m/s.

En resumen, los perfiles de suelos obtenidos con el método MASW para la ciudad de Arequipa - Cercado, evidencian la presencia de suelos superficiales conformados por una capa I de poco espesor y baja velocidad, asentada sobre otra con espesores que fluctúan entre 5 a 12 metros y velocidades V_s alrededor de los 350 m/s correspondientes a suelos blandos a duros. El semi-espacio hacia el Norte del área de estudio alcanza velocidades de hasta 1000 m/s y conforme se tiende hacia el extremo Este y Sur, las velocidades disminuyen a 500 y 700 m/s respectivamente. Estos resultados evidencian la presencia de una tercera capa antes de llegar a roca.

11.3.- Periodos Dominantes

Para presentar los resultados finales obtenidos con la técnica H/V, los valores de frecuencias fueron transformados a periodos dominantes y para construir el mapa de periodos, se asignó a cada punto de medición un radio de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilita los procedimientos seguidos para la zonificación de los suelos.

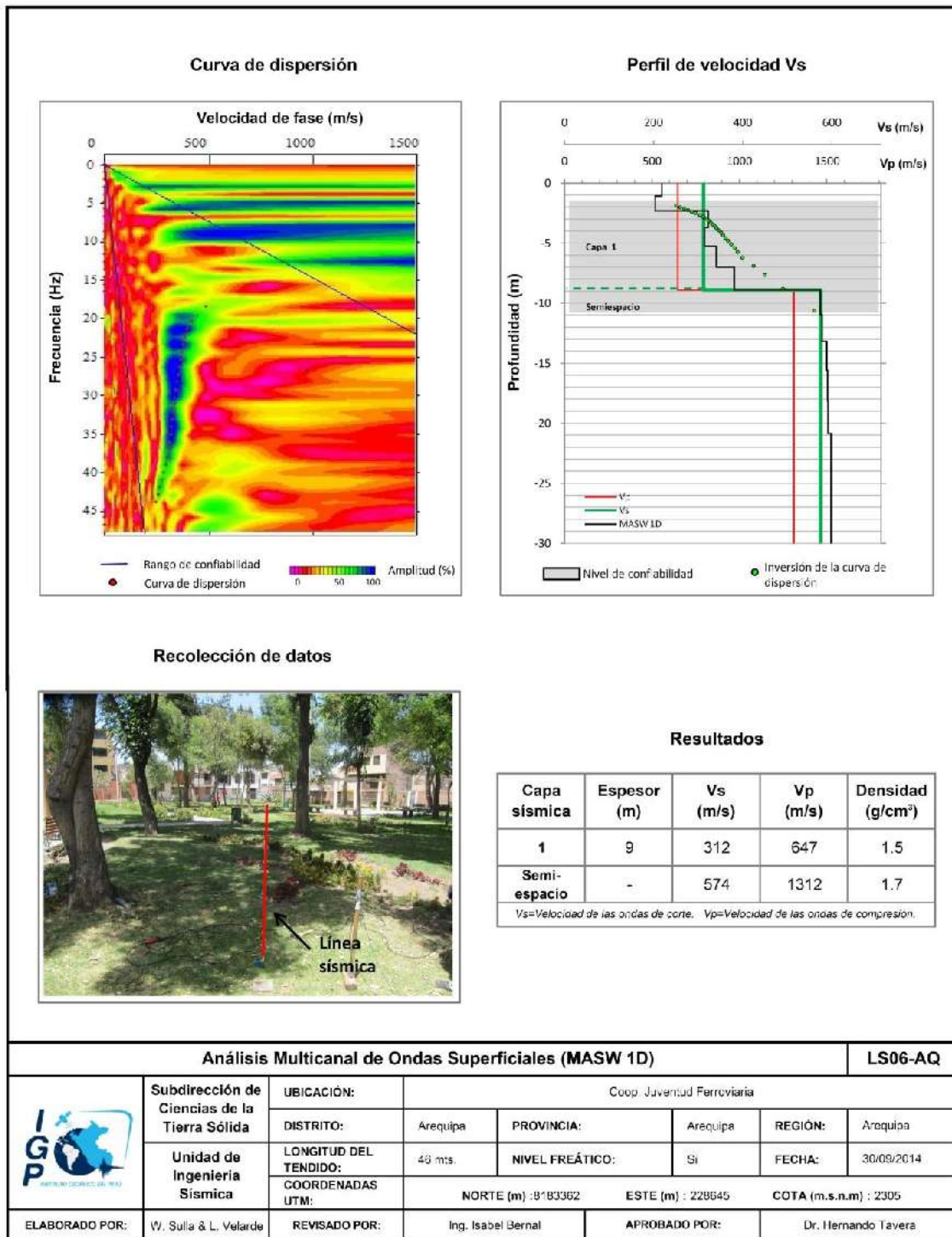


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS06-AQ.

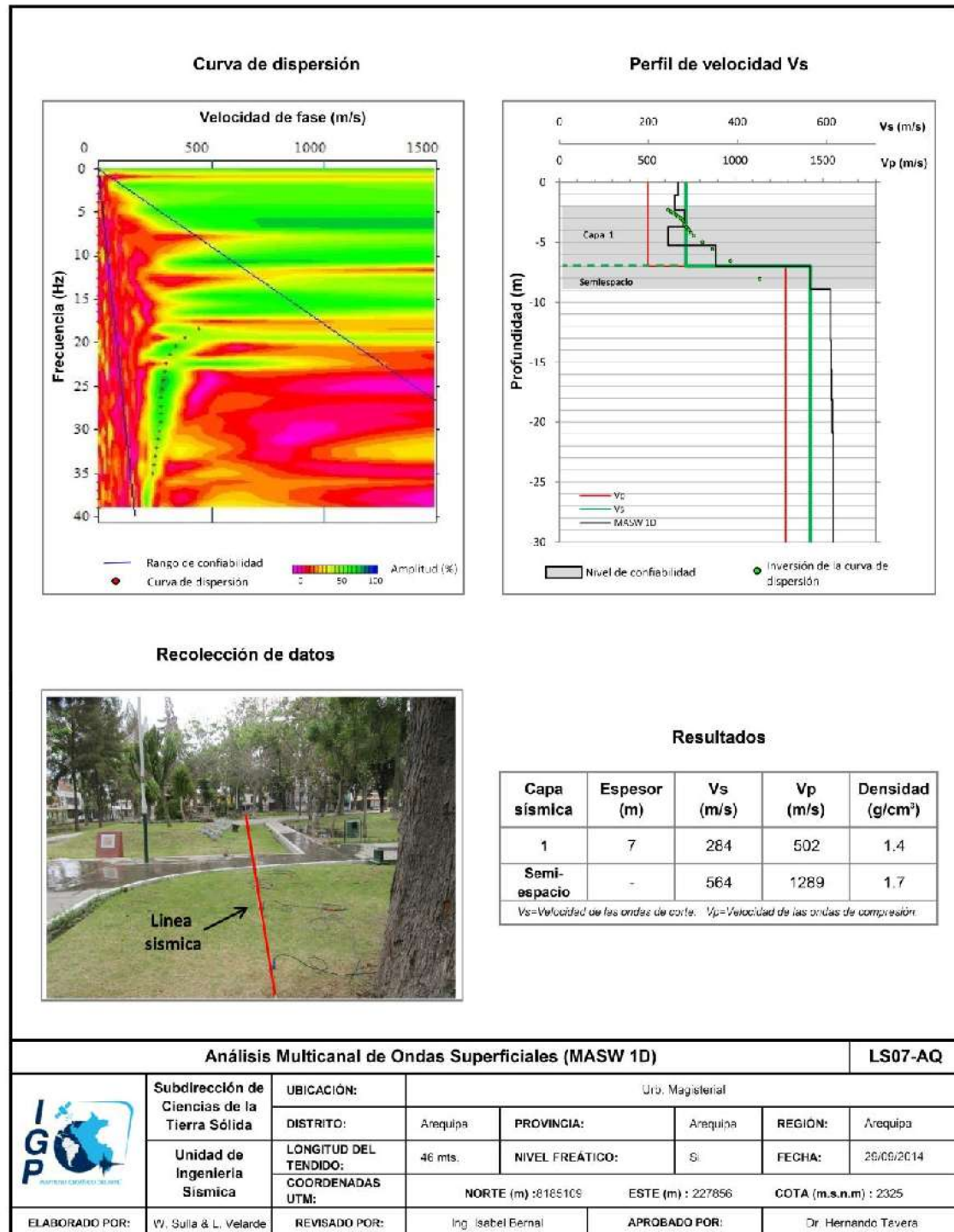


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS07-AQ.

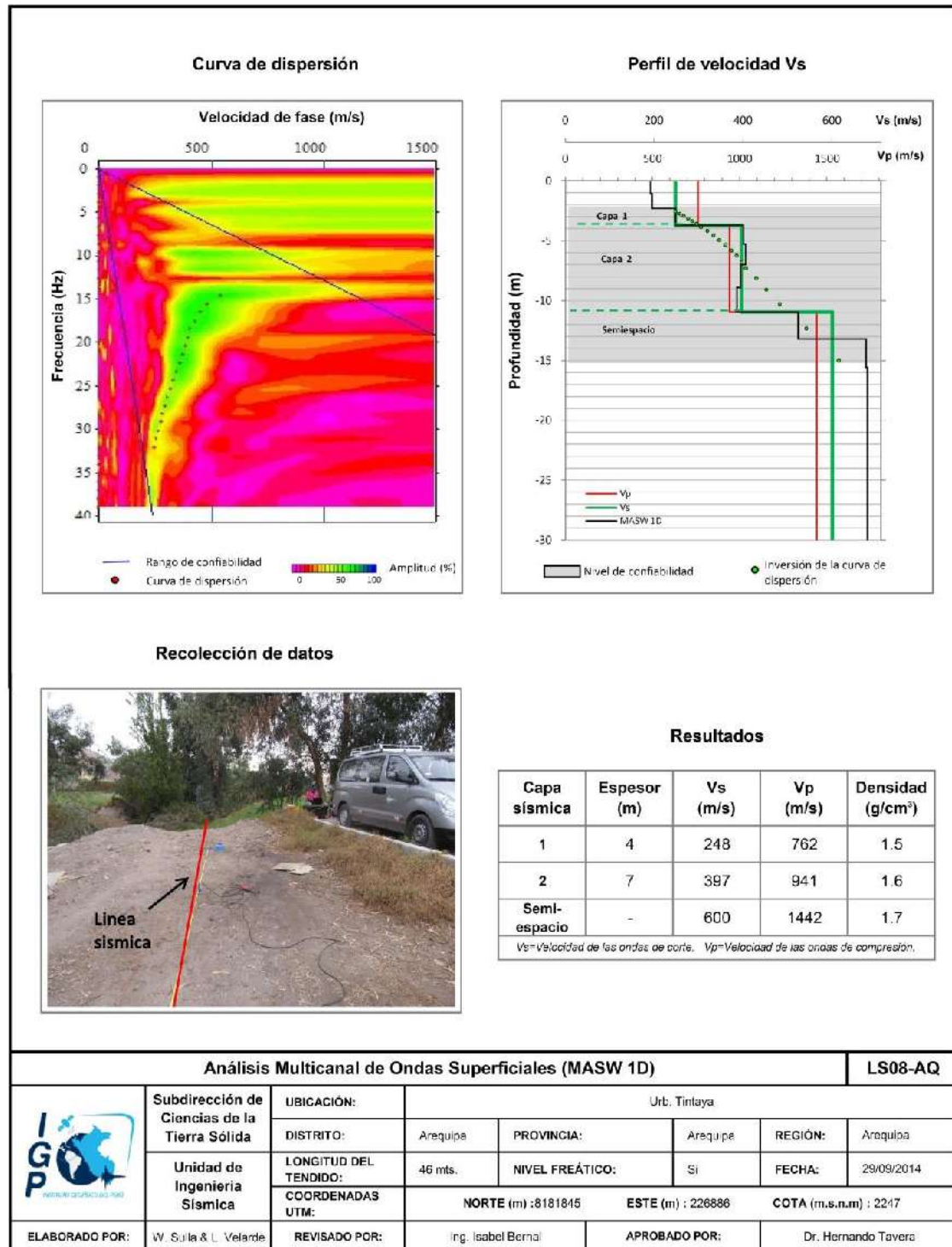


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS08-AQ.

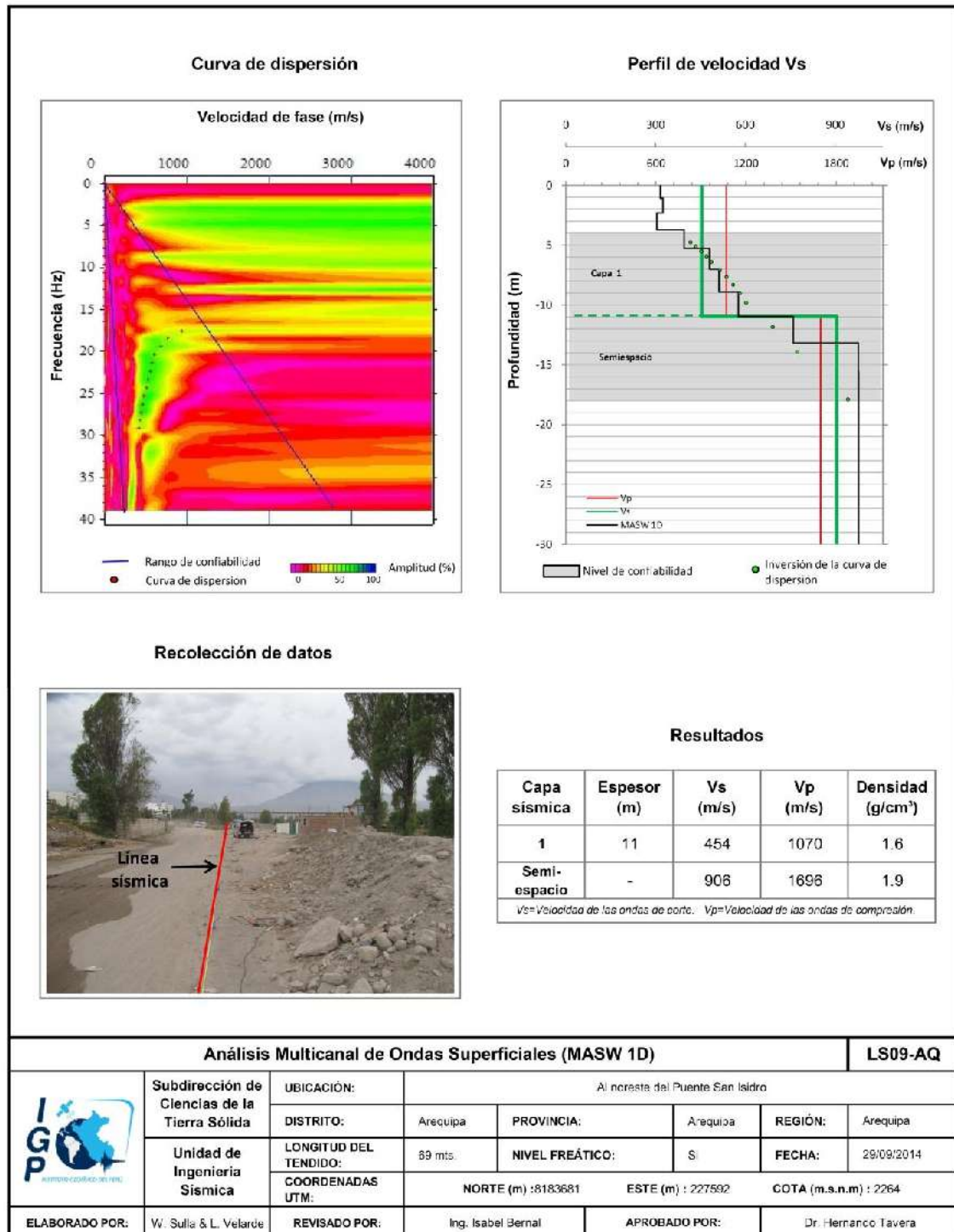


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS09-AQ.

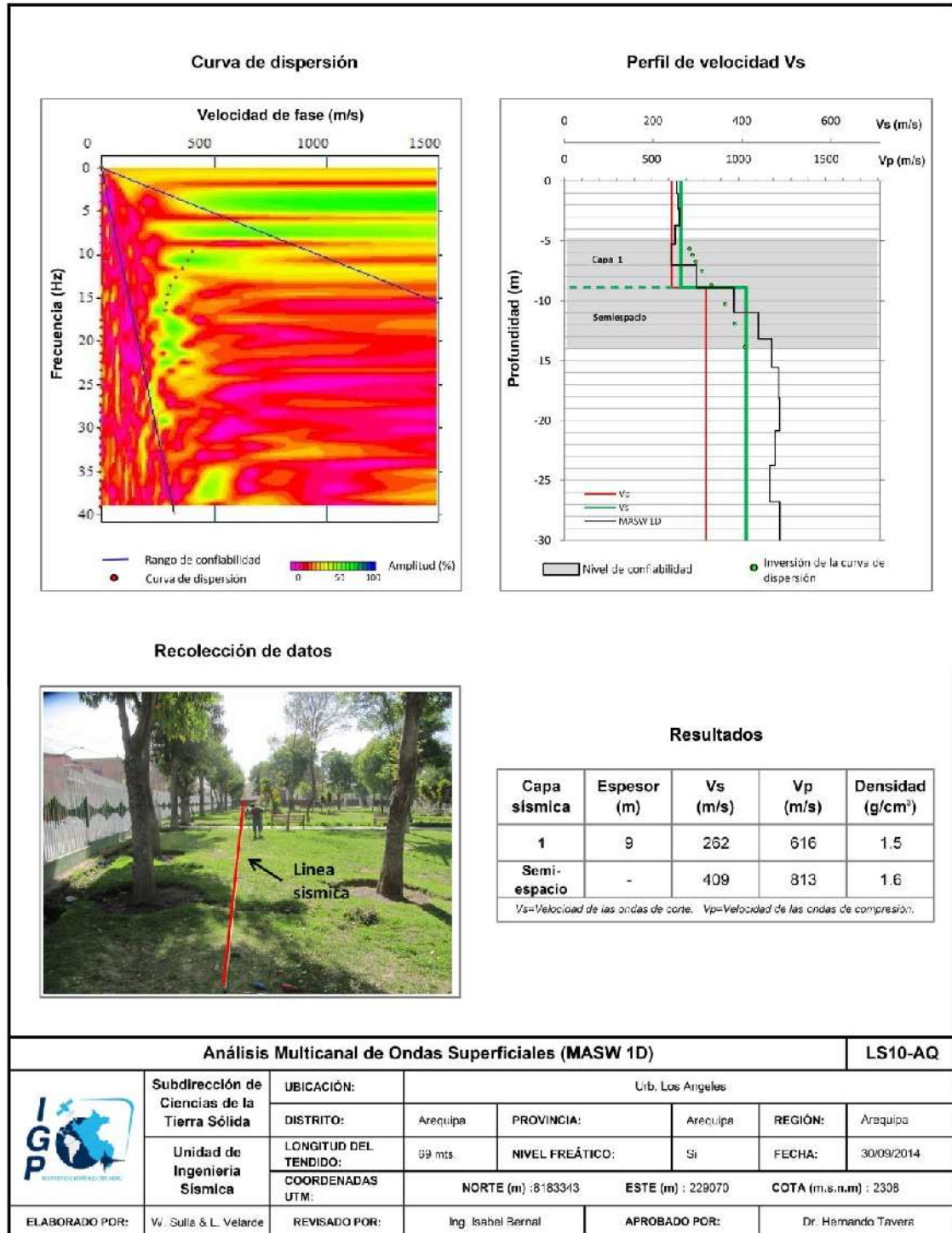


Figura 47: Continuación... // Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LS10-AQ.

En la Figura 48 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la Ciudad de Arequipa. Los periodos entre 0.3 y 0.5 segundos, se distribuyen en el extremo Este de la ciudad, entre las torrenteras de Miraflores (Av. Venezuela) y Mariano Melgar, y con mayor concentración en las cercanías del Estadio de la Universidad San Agustín. Estos mismos periodos están dispersos al extremo SE del estadio Mariano Melgar y hacia el extremo Norte, próximo a la Av. Chilina en donde algunos puntos evidencian periodos del orden de 0.3 segundos. Periodos entre 0.1 a 0.2 segundo se distribuyen sobre el 80 % del área de estudio.

Asimismo, en la Figura 48 se muestra con números en negro a las áreas en las cuales los periodos presentan mayor amplificación, todos ubicados en el extremo NE de la ciudad. En gris se presenta los periodos con menor amplificación y se encuentra principalmente en el extremo SO y margen derecha del río Chili. Del mismo modo, se observa la presencia de áreas pequeñas en las cuales los suelos no muestran amplificaciones, lo cual sugiere que los suelos son competentes. En general, la ciudad de Arequipa – Cercado se encuentra sobre suelos conformados por una terraza de grava muy consistente, además de la presencia de suelos en una capa superficial muy delgada y de menor consistencia. El análisis detallado de los resultados obtenidos en este estudio, han permitido identificar la presencia de suelos que responden a periodos dominantes entre 0.7 y 1.4 segundos, los cuales acondicionan la dinámica local del subsuelo; sin embargo, estos valores requieren un mayor análisis para su interpretación que posteriormente se realizara, pero debe ser considerado al construir estructuras determinandas..

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la Ciudad de Arequipa-Cercado están relacionados por sus condiciones físico - dinámicas a través de la relación $T_0 = 4H/V_s$ (T_0 , periodo dominante; H , espesor del estrato y V_s , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte (V_s), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo. Asumiendo, una velocidad de 350 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.2 y 0.5 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 17 y 43 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con métodos geofísicos. Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra la presencia de tres áreas con suelos dinámicamente similares. El extremo Este, entre las torrenteras de Mariano Melgar y Miraflores, sobre un área de menor dimensión se distribuyen periodos entre 0.4 a 0.5 segundos y de entre 0.3 a 0.4

segundos de manera sectorizada. En el resto del área de la ciudad, se tiene periodos dominantes de 0.1 y 0.2 segundos.

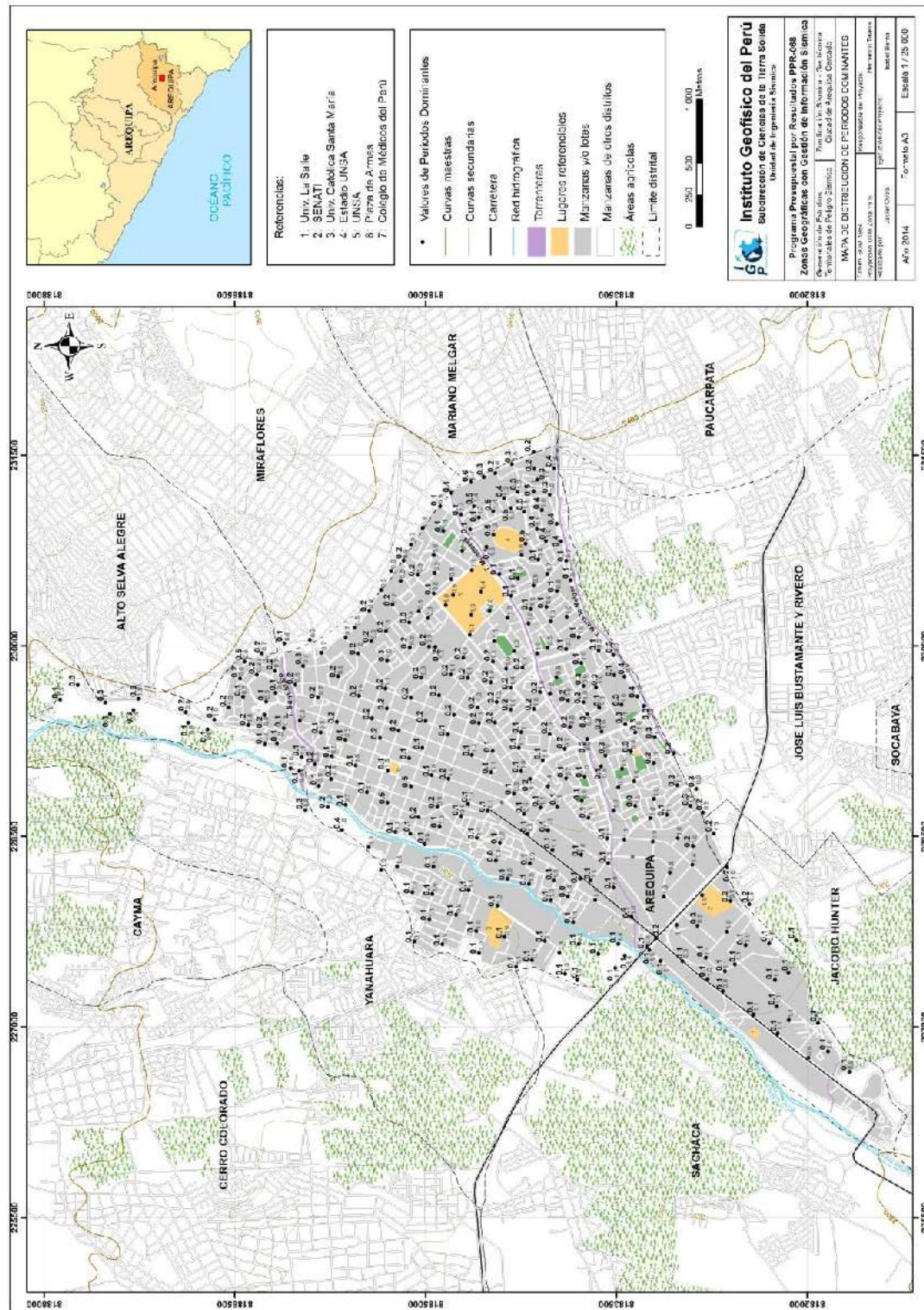


Figura 48: Mapa de la ciudad de Arequipa - Cercado y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes con amplitud elevada y en gris los de menor amplitud.

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Arequipa - Cercado se ha realizado 7 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo, la distribución de 23 a 30 electrodos con un espaciamiento de 3 a 6 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 66 a 144 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 23 metros (Figura 49).

A continuación, se describe las características de cada uno de las secciones geo-eléctricas obtenidas a fin de conocer el valor real de la resistividad del subsuelo, en la ciudad de Arequipa - Cercado (Figura 50).

Sección geo-eléctrica L01-AQ: Sección realizada en el extremo NE del centro de la ciudad, calle Benavides. En esta sección predominan valores resistivos. A lo largo de la sección, se distribuyen valores de 100 a 500 ohm.m, alcanzando profundidades de hasta 23 metros. Valores menores a 100 ohm.m son visibles a 5 metros de profundidad tomando una forma elipsoidal y hacia el extremo inferior derecho, alcanzan profundidades de hasta 23 metros. Se observan valores mayores a 500 ohm.m, tanto en la parte superficial como a profundidad, teniendo formas irregulares. Los materiales presentes en la parte superficial son suelos arcillosos limosos con presencia de vegetación.

Sección geo-eléctrica L02-AC: Sección realizada en el parque Hipólito Unanue. En esta sección, predominan valores resistivos y medianamente resistivos. A lo largo de la sección se distribuyen valores entre 100 y 500 ohm.m, hasta profundidades que alcanzan los 8 metros e el extremo izquierdo de la sección. Valores mayores a 500 ohm.m están presentes a lo largo de la sección (desde aproximadamente 3 metros de profundidad) hasta aproximadamente 12 metros de profundidad. Valores mayores a 1500 ohm.m encerrados en elipses se encuentran en la parte central de la sección. En profundidad se observan valores entre 16 y 100 ohm.m. Los materiales que conforman la superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.

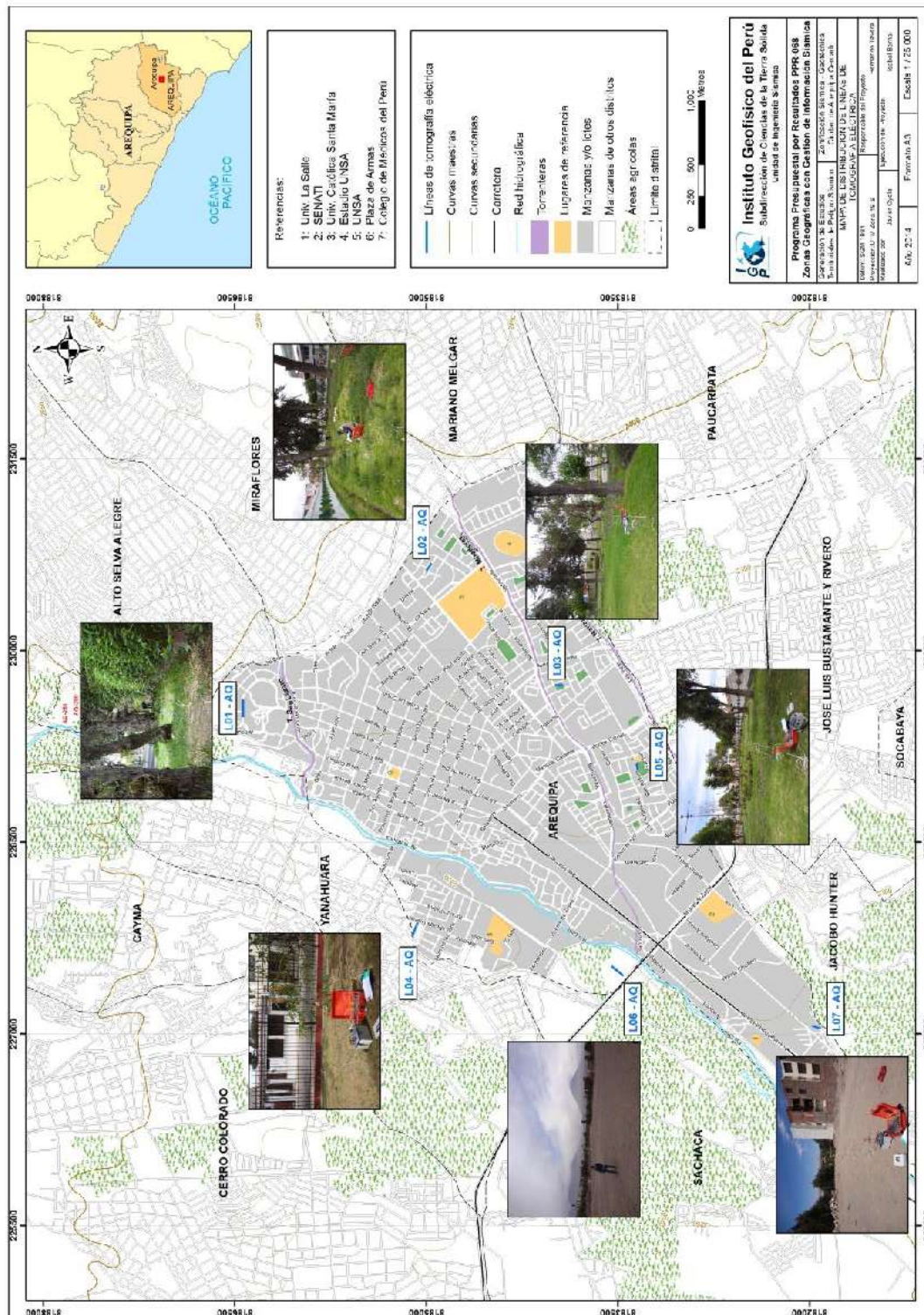


Figura 49: Mapa de la ciudad de Arequipa - Cercado y ubicación de las 7 líneas de tomografía eléctrica.

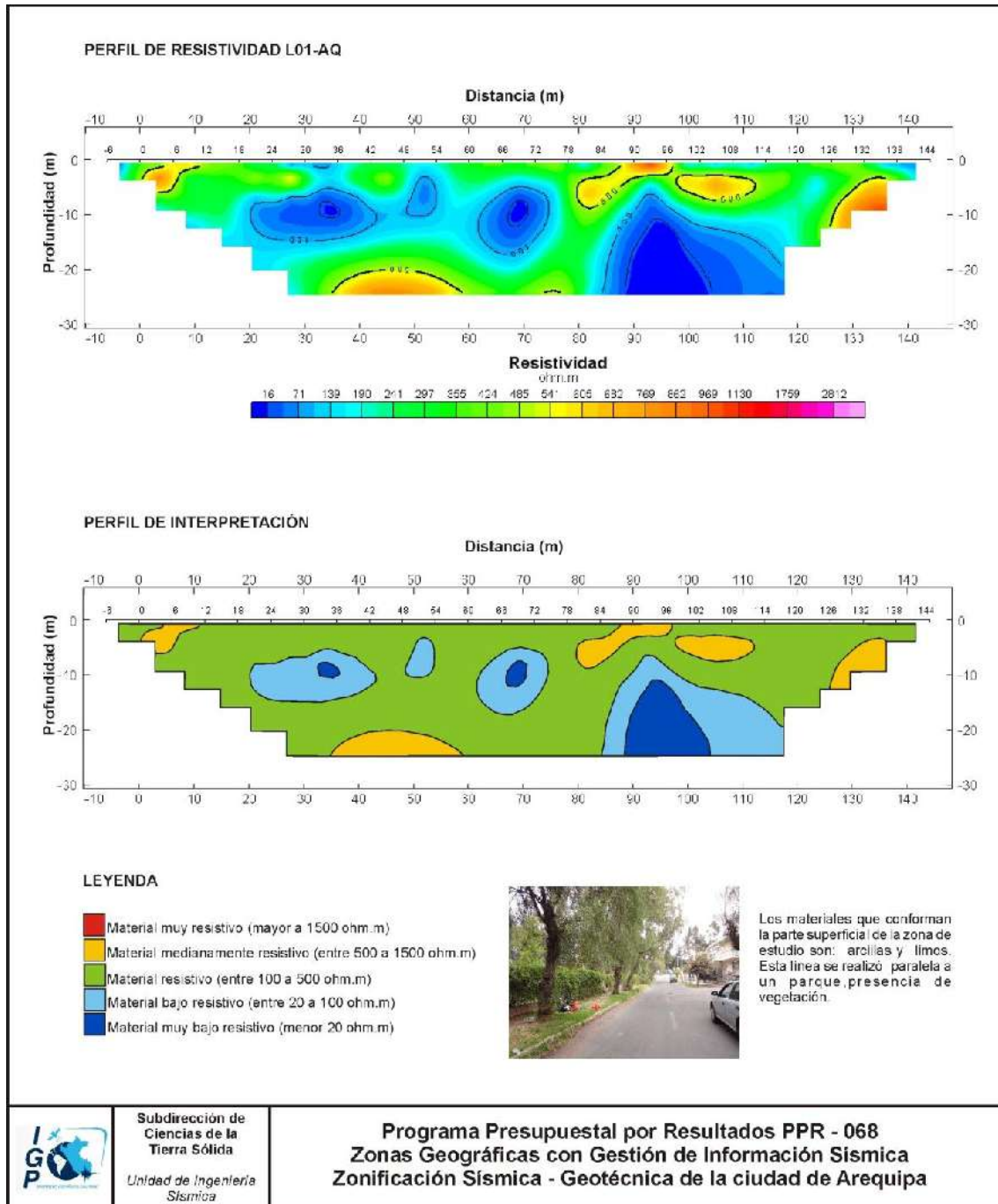


Figura 50: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-AQ.

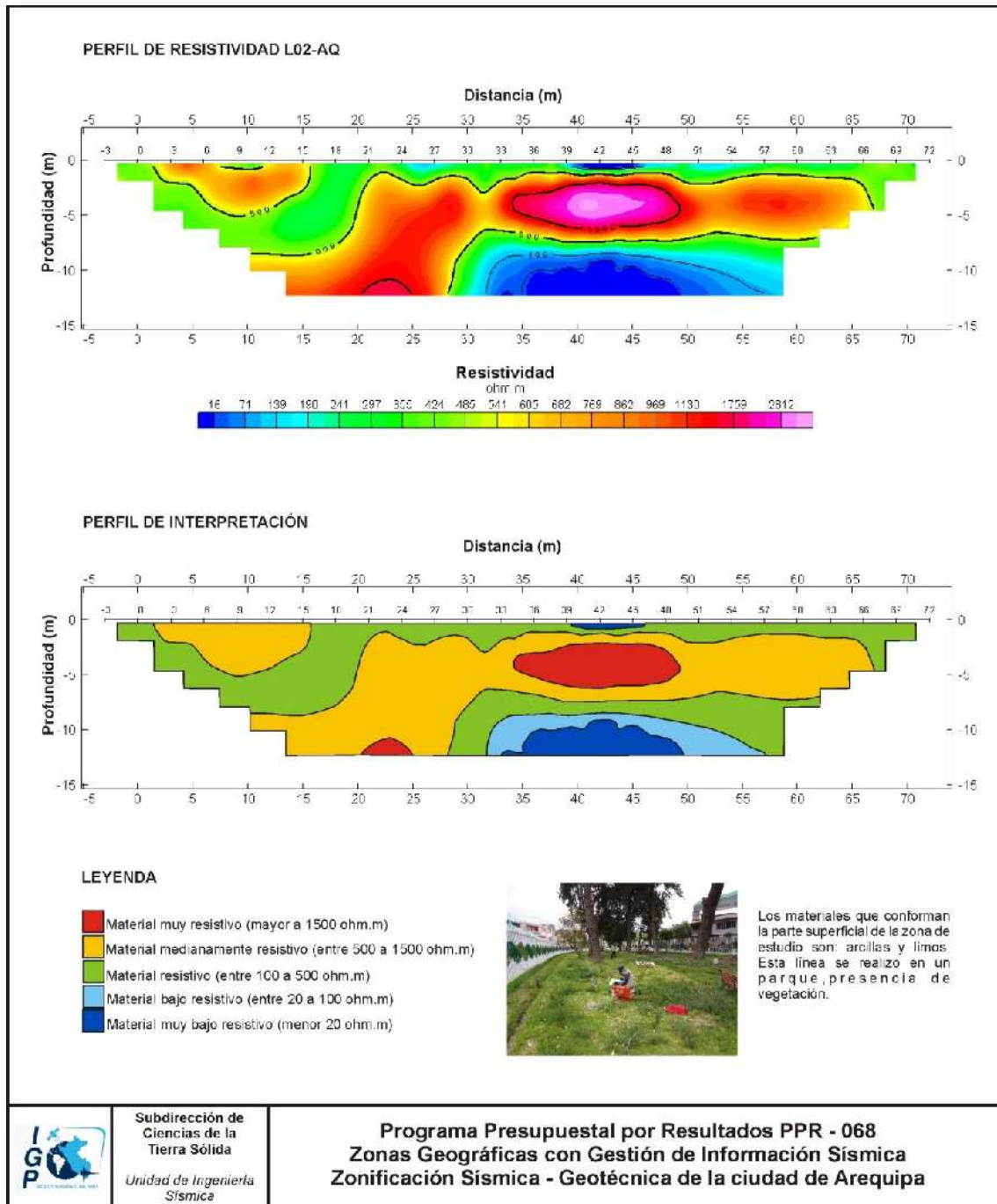


Figura 50: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-AQ.

Sección geo-eléctrica L03-AQ: Sección realizada en el parque Cabaña María, próximo a la Av. Venezuela. En la sección predominan valores medianamente resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores de entre 101 y 500 ohm.m hasta profundidades de 3 a 8 metros conforme se tiende hacia el extremo derecho de la sección. A mayor profundidad, los valores fluctúan entre 501 y 2812 ohm.m concentrándose los valores más altos a distancias, a lo largo de la línea, entre 27 y 36 metros, además de alcanzar profundidades de hasta 12 metros. Estos valores de resistividad también se observan entre los electrodos 18 y 21 con profundidades entre 3 y 6 metros tomando una forma elíptica. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.

Sección geo-eléctrica L04-AQ: Sección realizada en el parque Víctor Andrés Belaunde con el predominio de valores resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores de entre 100 y 500 ohm.m, con profundidades que varían entre 6 y 20 metros, en la parte inferior izquierda y superior derecha los valores están entre 500 y 2812 ohm.m. Entre los electrodos 60 y 90 se observa valores entre 16 y 100 ohm.m, para niveles de profundidad de hasta 20 metros. Estos valores de resistividad también se observan entre los electrodos 40 y 48, adquiriendo formas elípticas.

Sección geo-eléctrica L05-AQ: Sección realizada en el parque San Jerónimo con el predominio de valores resistivos a medianamente resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 16 y 500 ohm.m hasta profundidades de 12 metros. Valores que van entre 501 y 1500 ohm.m se distribuyen a lo largo de la sección alcanzando profundidades de 3 a 18 metros. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso arcilloso con presencia de vegetación.

Sección geo-eléctrica L06-AQ: Sección realizada en las cercanías del puente San Isidro, próximo al río Chili. En esta sección predominan valores resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 101 y 500 ohm.m, hasta profundidades de 20 metros. Entre los electrodos 31 y 40 se observa la presencia de valores mayores a 500 ohm.m asumiendo formas elípticas. Valores entre 16 y 100 ohm.m se distribuyen en la parte superior izquierda hasta el electrodo 45; mientras que, en la parte inferior izquierda se

observan valores entre 20 y 100 ohm.m. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso, arenoso y gravoso. Los valores bajos de resistividad pueden deberse a la infiltración de agua ocasionada por los terrenos de cultivo y la proximidad del río Chili.

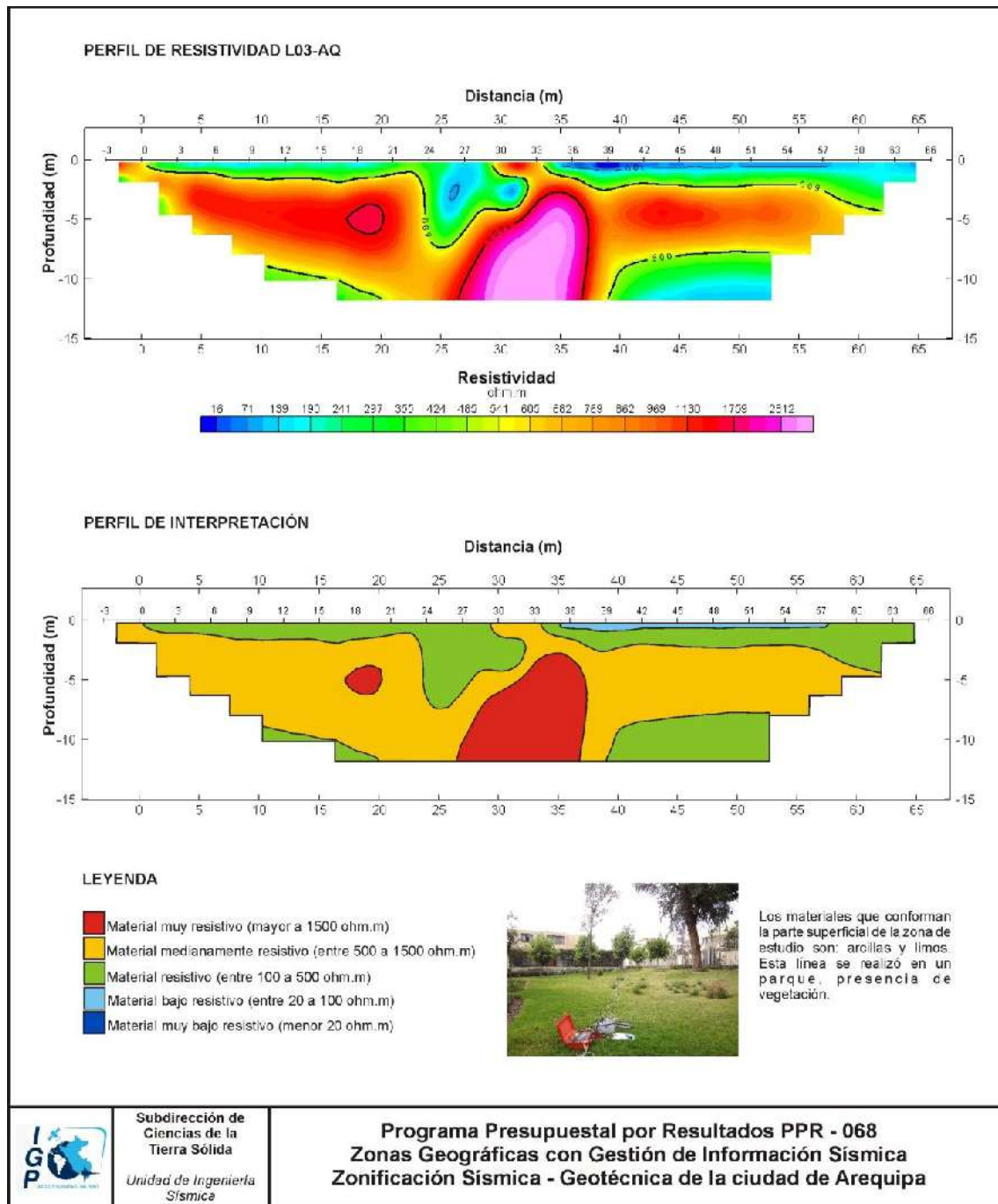


Figura 50: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-AQ.

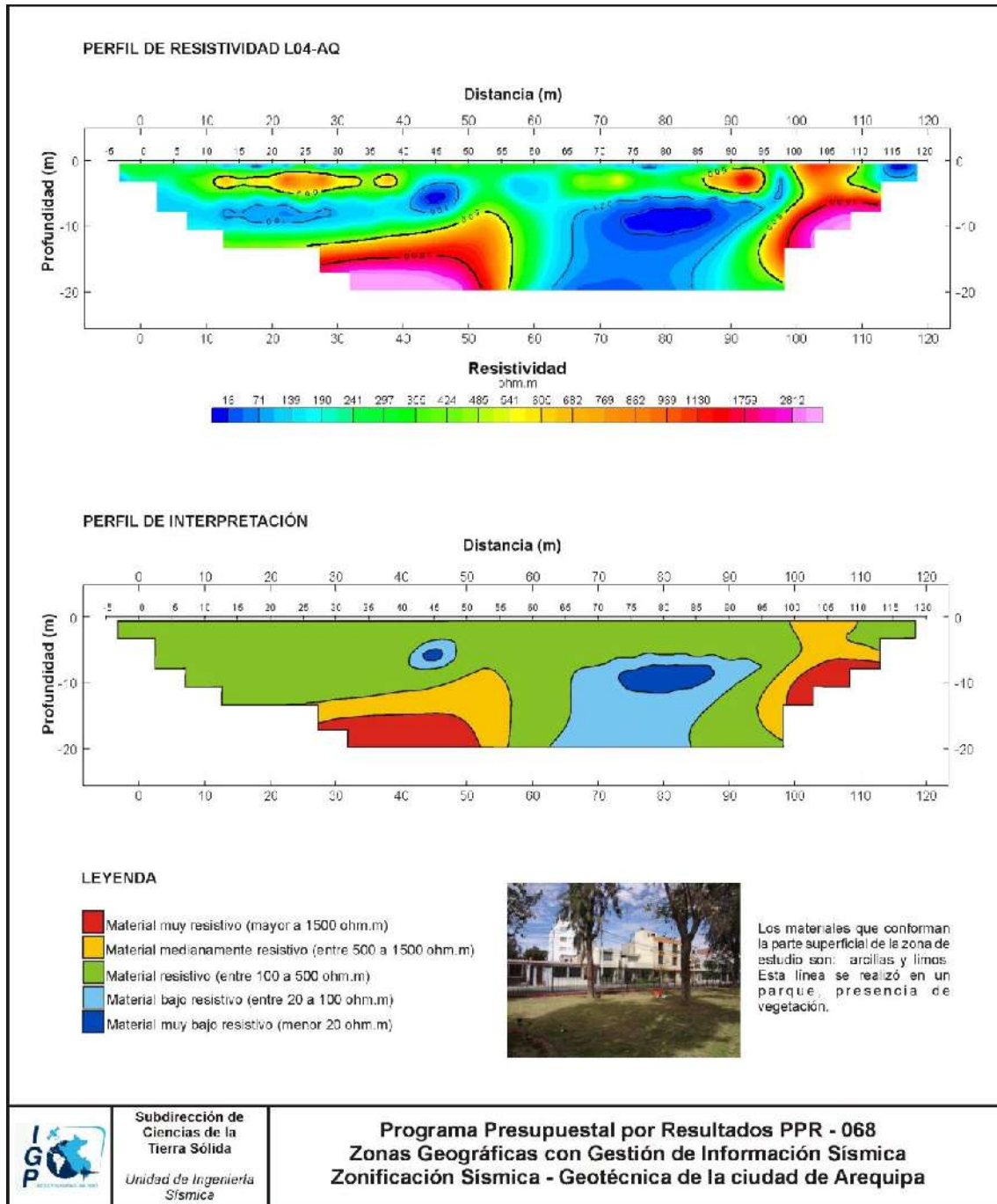


Figura 50: Continuación...// Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-AQ.

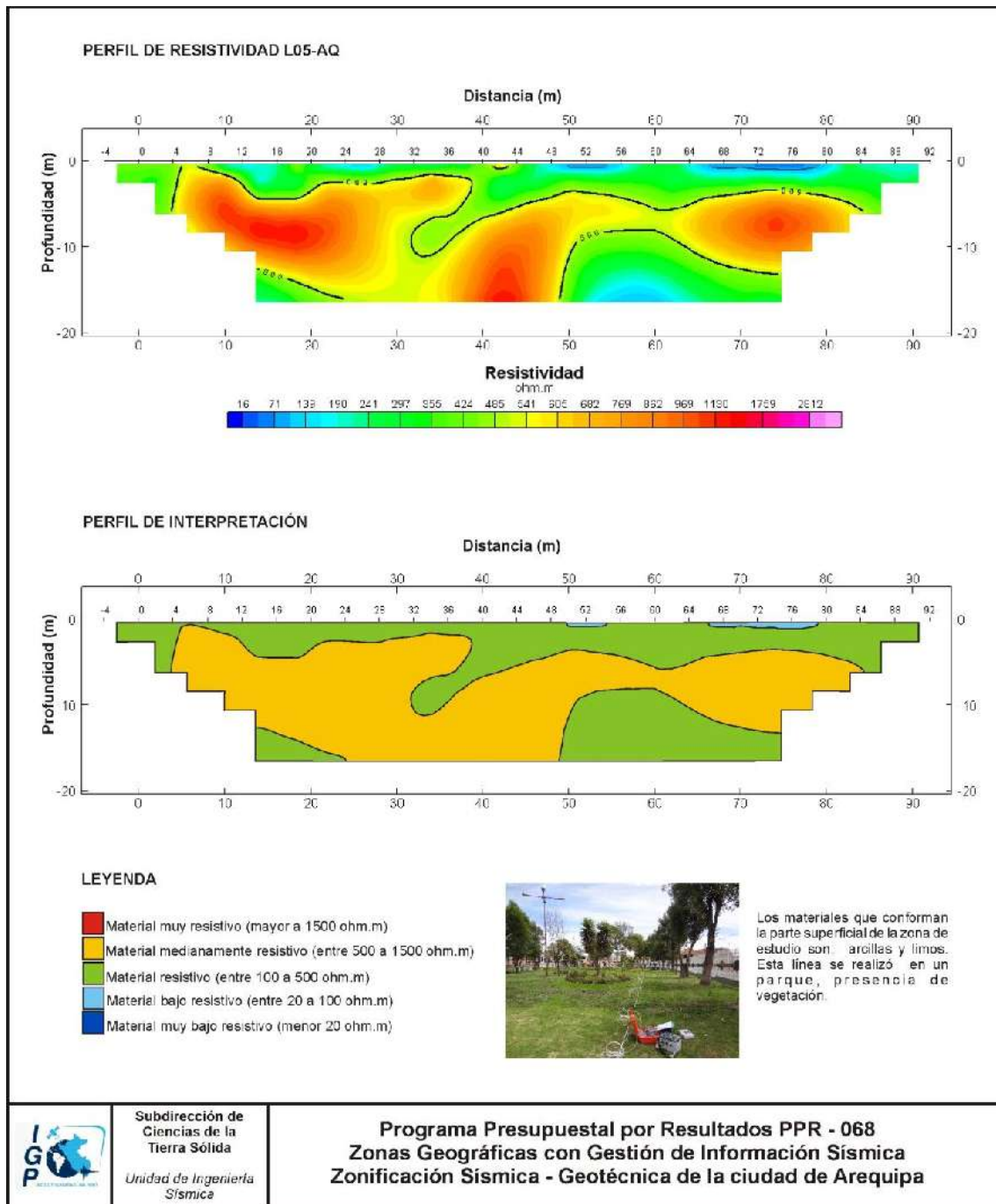


Figura 50: Continuación...// Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L05-AQ.

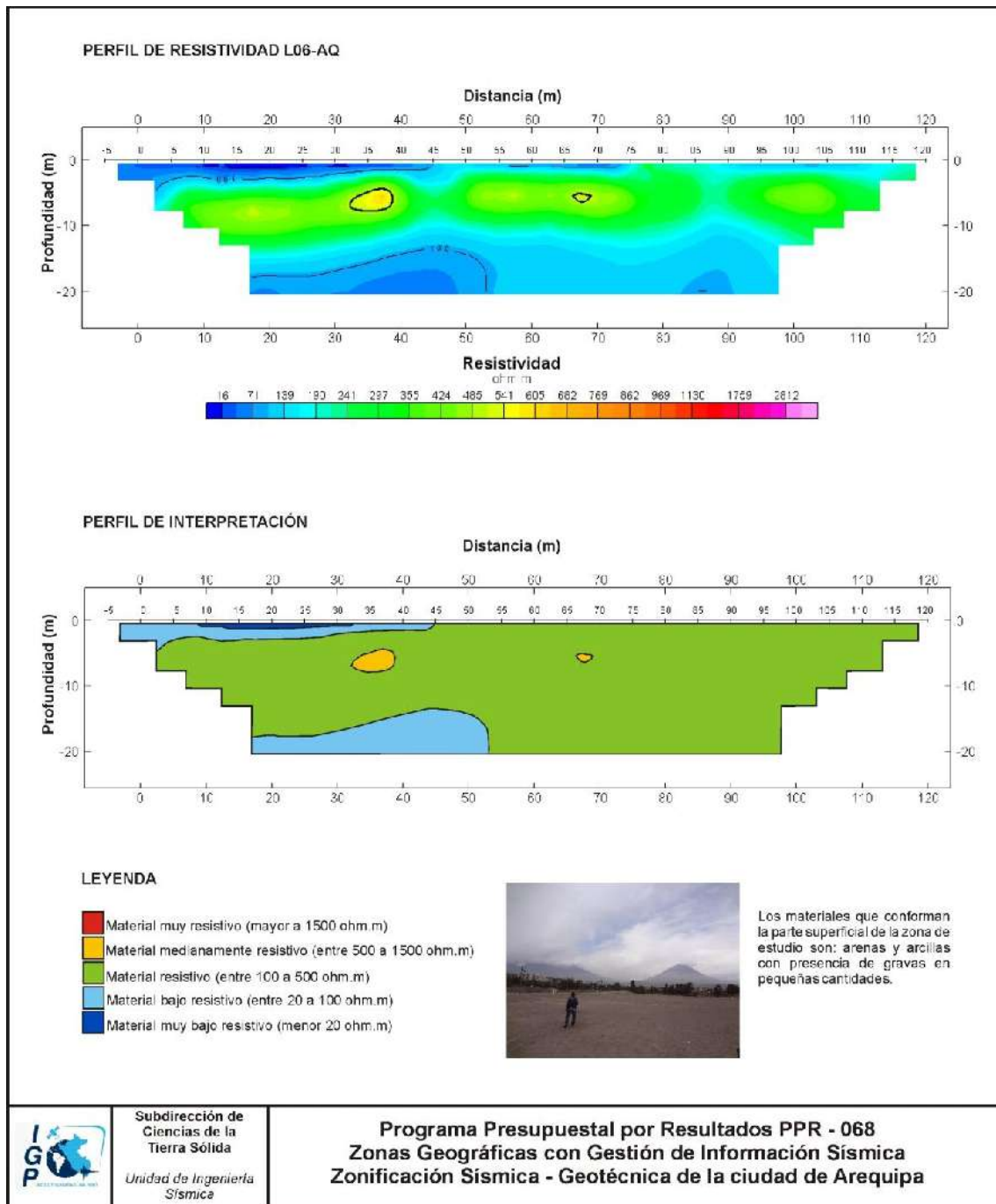


Figura 50: Continuación...// Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L06-AQ.

Sección geo-eléctrica L07-AQ: Sección realizada en la urbanización Gloria, en la proximidad del club de abogados. En esta sección predominan valores medianamente resistivos. En la parte superficial se observan valores entre 101 y 500 ohm.m hasta profundidades de 3 metros. Estos valores también están presentes entre los electrodos 32 y 39 alcanzando profundidades entre 6 y 12 metros. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 501 y 1500 ohm.m, con profundidades variables. Los materiales que conforman la parte superficial del área de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso, arenoso, gravoso y desmonte. Los valores bajos pueden deberse a la presencia de terrenos de cultivo que aportan humedad y los valores medianamente resistivos a muy resistivos, al material de desmonte y gravas presentes en las proximidades

En resumen, en el extremo Este de la ciudad de Arequipa - Cercado, la distribución de los valores de resistividad evidencia la presencia de valores resistivos a medianamente resistivos (secciones realizadas en parques). En el extremo Oeste de la ciudad, predominan valores resistivos y medianamente resistivos y en este caso las secciones se realizaron en parques, a excepción de la sección L06-AQ que se realizó próxima al río Chili y sus valores de resistividad son asociados a la presencia de gravas e infiltraciones del río y terrenos de cultivo. La sección L07-AQ se realizó en la proximidad de terrenos de cultivo con la presencia de gravas y desmontes.

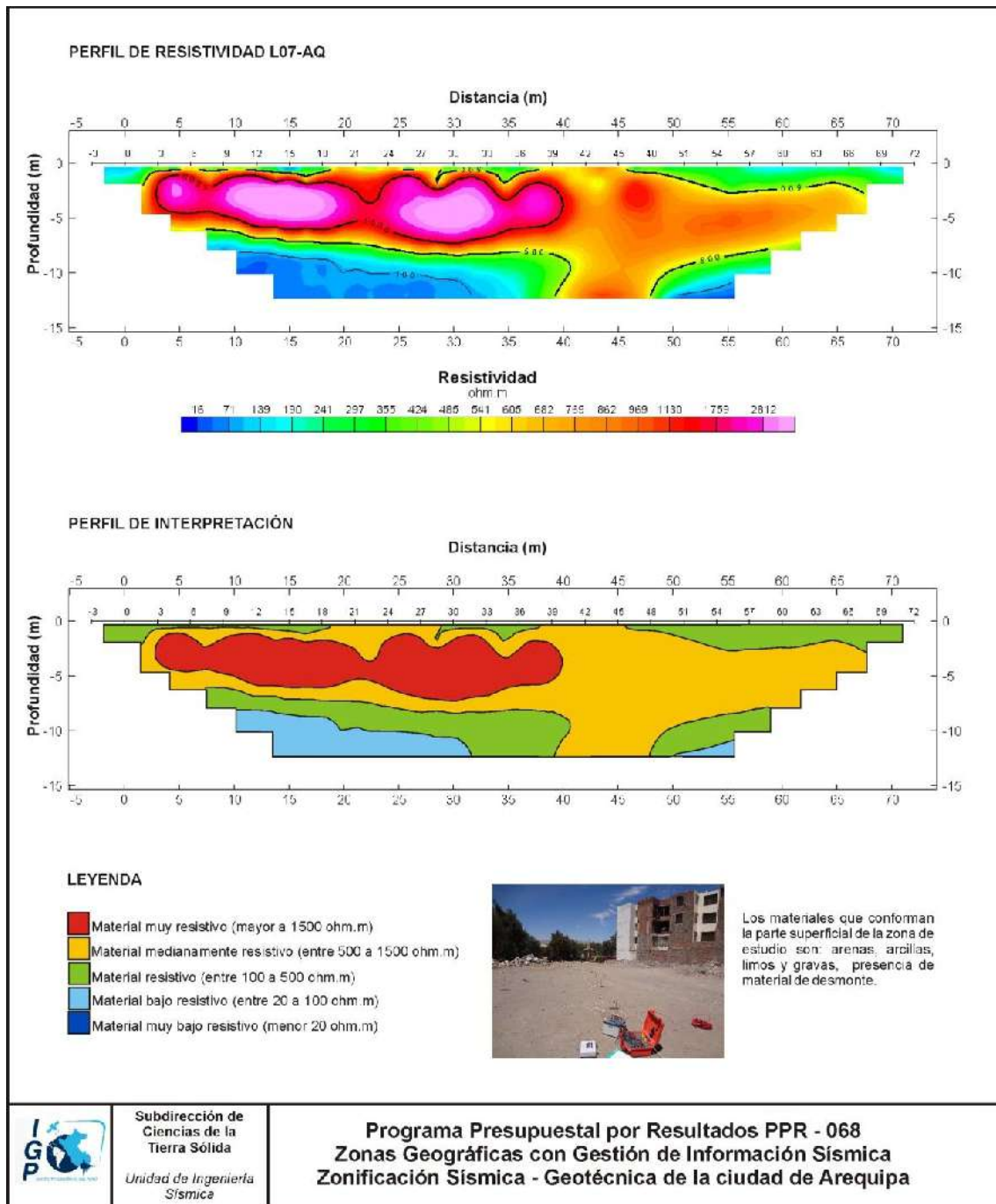


Figura 50: Continuación...// Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L07-AQ.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Arequipa - Cercado considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Arequipa - Cercado, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de dos tipos de suelo: Tipo S1 y Tipo S2.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Arequipa - Cercado se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 51):

ZONA I: *Conformada por estratos de origen ígneo (material volcánico) cubiertos por un manto de origen fluvio-aluvial de menor consistencia y de poco espesor (4 a 5 metros). A profundidad el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían de entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Las velocidades de corte pueden variar alrededor de los 350 m/s para la capa superficial de poco espesor y de 500 a 700 m/s la capa más profunda (de 10 a 40 metros de espesor). Estos suelos presentan capacidad portante alta.*

ZONA II: *Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos a medios y suelos fluvio-aluviales con espesores de hasta 15 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene material de origen ígneo y sedimentario. Esta zona se ubica en el extremo Este de la ciudad, principalmente entre las torrenteras de Miraflores y Mariano Melgar, y hacia el extremo Norte sobre un área pequeña, donde los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Los suelos presentan capacidad portante de media a alta.*

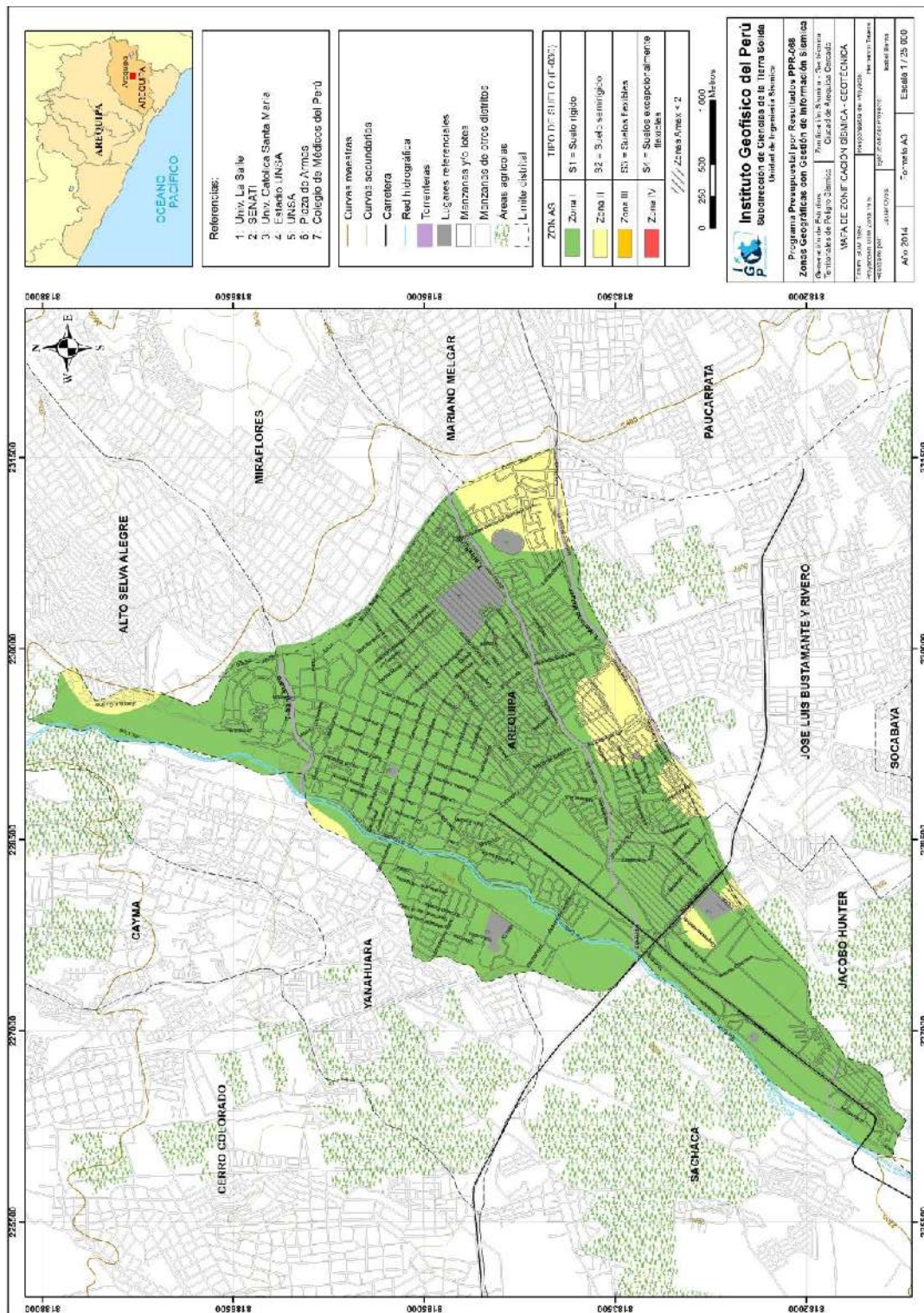


Figura 51: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Arequipa - Cercado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para la ciudad de Arequipa - Cercado, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

CONCLUSIONES

La ciudad de Arequipa - Cercado se encuentra asentada sobre una penillanura fluvio-aluvial producto de los materiales depositados cuando descendieron de las partes altas. Su geodinámica está representada por zonas de derrumbes e inundaciones generadas por el río Chili y la presencia de torrenteras. La capacidad portante de los suelos es alta ($>3 \text{ kg/cm}^3$); es decir, suelos bastante bien compactados.

Del mismo modo, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que toda la ciudad de Arequipa-Cercado se encuentra sobre suelos Tipo S1 y S2; y según la Norma de Construcción Sismorresistente corresponden a las ZONAS I y II.

RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales y regionales de la ciudad de Arequipa - Cercado para una mejor Gestión del Riesgo ante la ocurrencia de sismos y efectos secundarios. Del mismo modo, para aportar con las normativas necesarias para el desarrollo y expansión urbana de la ciudad de Arequipa - Cercado.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., Egozcue y A. Ugalde (1999): Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtemores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica, España.
- Agro Acción Alemana (2010): Gestion de riesgos en Ancash. Experiencias y propuestas. Ministerio Aleman.
- APESEG (2005): Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, CISMID, 10 pag.
- Aki, K., (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtemors. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo 35, 415–457.
- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 2207
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, “Nonlinear Soil Amplification: It’s Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2002) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Bernal, I. (2006): Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – Mexico. Tesis de Maestría, II-UNAM, Mexico.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): Pruebas de vibración ambiental realizadas en la localidad de Condormarca, provincia de Bolívar. Dpto. de la Libertad. Informe Técnico, 23p.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP, 22p.
- Braja, M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson y Learning, 580 pag.
- Caldas, J. (1978). Geología del cuadrángulo de San Juan, Acarí y Yauca. 31-m. INGEMMET, Boletín A-30.
- Capon, J.,(1973): Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array, in *Methods in Computational Physics*, Vol. 13, ed. Bolt, B.A., Academic Press Inc, New York

- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catalogo de Gustakov (2002). BSGP, V94, 45-59.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avoac, J-P. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along Central Andes subduction zone. J. G. R. Vol 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. IAEG. Bull. 43, 27-29.
- Casagrande. A. (1948): Classification and identification of soils, American Society of Civil Engineers, Transactions, Vol. 113, 901-991.
- Cobbing, J. (1970). Geología de los cuadrángulos de Huacho (23h). Boletín N°26 , INGEMMET.
- Dale D. (1990). Mountain waves and Downslope Winds. Meteorological Monographs. 23:59 81
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- Escobar, D. 1993. Evolución climática y sinóptica de los vientos Paracas. Tesis Ing. Meteorólogo. Facultad de Ciencias, Dpto. Física y Meteorología. UNALM.
- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects. *Journal of Seismology*, 7, 449-467
- Goto, C. y Ogawa, Y. (1992): Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme. Translated for the TIME project by N Shuto.
- Guillier, B., J.-L. Chatelain . H. Tavera . H. Perfettini . A. Ochoa . B. Herrera (2014): Establishing empirical period formula for RC buildings in Lima (Peru): evidence for the impact of both the 1974 Lima earthquake and the application of the Peruvian seismic code on high-rise buildings (in preparation).
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). Geomorfología. Pearson Education, S.A., Madrid, 898 pp.
- Gutierrez, C. y S.K. Singh (1992): A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- Guevara, C. (1961): Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clemesi, INGEMMET,
- Hartzel, S. H. (1992). Site response estimation from earthquake data. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 2308-2327
- Hutchinson, J.N. (1986). A sliding-consolidation model for flow slides, *Can.Geotech.J.*, 23, 115-126

- INADUR (2000): Mapa de peligros y plan de uso del suelo de la ciudad de Chimbote. Instituto Nacional de Desarrollo Urbano.
- INDECI (2001): Informes de los principales desastres ocurridos en Perú. Instituto de Defensa Civil del Perú.
- INGEMMET (1970): Cuadrángulo Geológicos de Barranca. Boletín N°26 – hoja 22h. Sector Energía y Minas.
- Knighton, A. (1998): *Fluvial Forms & Processes: a new Perspective* . Londres. Arnold
- Lachet, C. y P. Y. Bard (1994): Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994a): Are microtremors useful in site response evaluation?, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364 pp.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994b): Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil. Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423 pp.
- Loke MH (2001). Tutorial: 2 D and 3 D electrical imaging survey, Geotomo Software, Malaysia
- Morisawa, M. (1968). *Streams: their dynamics and morphology*. McGraw-Hill. New York, New York, USA.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1, 25-33 pp.
- Norma E-30 (2003): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Pagador, C. (2010). Evaluación de recursos hídricos superficiales en la Cuenca del río Huaura. Autoridad nacional del agua.
- Papazachos, et al. (2004): Global realtions between seismic fault parameters and momento magnitude of eathquakes. *Bull. Geol. Soc. of Greece*, 36, 1482-1489.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530

- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, Seis. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- SENAMMHI (2008): Datos de temperaturas máximas y mínimas de la Estación Pampa Blanca.
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. Journal of Seismology 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- Tavera et al, (2002): The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. Journal of Seismology, 6: 279-283, 2002.
- Tavera et al. (2013). Sismo de Acari-Yauca del 25 de setiembre de 2013 (7.0Mw). Aspectos Sismológicos.. Dirección de Sismología, IGP. Informe Técnico N°03-2013. 25 pags.
- Tavera, H. (2001). El terremoto de la región sur del Perú del 23 de junio de 2001. Instituto geofísico del Perú. Informe Especial, Dirección de Sismología. 422 pag.
- Tavera, H. (2008). EL terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto de 2007 (7.9 Mw). Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología. Informe Especial. 480 pags.
- Tavera, H. (2001). El terremoto de la Región Sur del Peru del 23 de Junio de 2001. Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera, H. (2014). Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Tavera, H. 2008): El terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007 (7.9 Mw). Dirección de Sismología, IGP, Lima – Perú.
- Tavera et al, (2014). Estimación del Peligro Sísmico para el Perú. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.

- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes. Seism. Res. Lett., V-68, N-1, January/February.

MAPAS