



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú

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 DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE MALA

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima - Perú

2016

ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE MALA

Provincia de Cañete - Departamento de Lima
(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MsC. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MsC. Juan Carlos Gómez

Personal Participante

Wilfredo Sulla

Roberth Carrillo

Kelly Pari

Segundo Ortiz

Liliana Torres

Julio Lara

Fabiola Rosado

Mariana Vivanco

Lizbeth Velarde

Christian Chiroque

Luz Arredondo

Héctor Lavado

Javier Oyola

Pilar Vivanco

Henry Salas

John Chahua

Orlando Hancoco

Jesús Huarachi

Apoyo Técnico

Estela Torres
Estherfilia Campos
Augusto Cárdenas
Roberth Yupanqui

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 para el área urbana de la ciudad de Mala, distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima. 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 el área urbana de la ciudad de Mala han permitido identificar la existencia de suelos codificados como Tipo S1 y S2 (suelos rígidos a semirrígidos), y de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), corresponden a las ZONAS I y II.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Mala 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.- DISTRITO Y CIUDAD DE MALA

3.1.- Aspectos Climáticos

4.- ANTECEDENTES

4.1.- Estudios previos

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de sismicidad

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 denudacional

9.1.1.2.- Origen depositacional

9.1.1.3.- Origen fluvial

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología regional

9.2.2.- Geología local

9.2.2.1.- Superunidad Jecuán

9.2.2.2.- Depósitos cuaternarios

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en masa

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Clasificación de suelos SUCS

10.2.- Ensayo de corte directo

10.3.- Capacidad de carga admisible

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 Granulometría

ANEXO 5: Fichas de Posteos

ANEXO 6: 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 2015 el Proyecto “**Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica**” y como parte del mismo, las Unidades de Ingeniería Sísmica y Geodinámica Superficial de la Sub-Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida desarrollan 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 áreas urbanas de las siguientes ciudades:

- **Asia**, distrito de Asia, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **San Vicente de Cañete**, capital de la provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Casma**, capital de la provincia de Casma, departamento de Ancash.
- **Cerro Azul**, distrito de Cerro Azul, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Chancay**, distrito de Chancay, provincia de Huaral, departamento de Lima.
- **Huaral**, capital de la provincia de Huaral, departamento de Lima.
- **Lunahuana**, distrito de Lunahuana, provincia de Cañete, departamento de Lima.
- **Mala**, distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima.

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región centro 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; Tavera et al. 2016). 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 en 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, 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, se debe 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 estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en este estudio. Asimismo, este estudio debe ser considerado como herramienta para la gestión del riesgo por autoridades locales y regionales.

2.- OBJETIVOS

El objetivo principal a cumplir en este estudio es obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para el área urbana de la ciudad de Mala, distrito de Mala, provincia de Cañete, departamento de Lima (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: Vista Panorámica del área urbana de la Ciudad de Mala

3.- DISTRITO Y CIUDAD DE MALA

El distrito de Mala es uno de los dieciséis que integran la provincia de Cañete, ubicada en el departamento de Lima, bajo la administración del Gobierno regional de Lima-Provincias. Limita por el norte con los distritos de San Antonio y Santa Cruz de Flores; por el sur con el Distrito de Asia en los cerros Campana y Cenizo; por el este con el Distrito de Calango, en el lugar llamado Tutumito; por el sur-este con el Distrito de Coayllo; y, por el oeste con el océano Pacífico (Figura 2). Mala ocupa un área de 129,31 km² y su población, según el censo de 2007, es de 27880 habitantes. La capital del distrito, que pertenece a la Región Costa o Chala, es la ciudad de San Pedro de Mala, situada a una altura de 32 metros sobre el nivel del mar.

Antes de la llegada de los españoles a Mala, habitaban la zona los huarcos, valientes y feroces guerreros que defendieron con su vida la fortaleza de Cañete, ante el avance avasallador de los incas. Luego, como parte del Imperio incaico, la población de Mala quedó bajo la influencia política y religiosa del santuario de Pachacámac. El distrito de Mala fue creado en época de la independencia mediante Decreto Supremo del 4 de agosto de 1821, por el Libertador José de San Martín. Se inicia a la vida republicana como uno de los ocho distritos de la Provincia de Cañete que incluía además Chilca, Coayllo, Lunahuaná, San Vicente, Pacarán, Chincha Alta y Chincha Baja.

La ciudad de Mala se encuentra en un valle de origen aluviónico, formado por la presencia del río del mismo nombre. En lo que corresponde al distrito de Mala, tiene como límite, por el norte al río Mala y por el sur y oeste elevaciones de regular altitud constituida por lomas y contrafuertes andinos que en ocasiones llegan hasta el litoral como en la zona de La Caleta de Bujama. Se presentan también, como accidentes geográficos importantes, los promontorios rocosos del cerro Salazar y El Salitre (en la zona del litoral), además del cerro Colorado y cerro Piñón (en el camino hacia Bujama Alta).

Mala es un distrito cuya mayor extensión comprende básicamente áreas rurales, siendo la zona urbana relativamente pequeña, llamada El Cercado. El casco urbano comprende por el norte, los barrios de La Barranca y La Rinconada. Por el sur, las urbanizaciones AVIMA, Mauricio Hoschild, Villa Condestable, Las Casuarinas y Los Frutales. Por el este, los asentamientos humanos Dignidad Nacional, San Juan

3.1.- Aspectos climáticos

Para conocer las condiciones climáticas en la ciudad de Mala, se han tomado datos referenciales de la web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación meteorológica "La Capilla 000631" (periodo 2013 – 2014), se encuentra ubicada a 22 Km al noreste de la ciudad de Mala, en las coordenadas geográficas: Latitud 12°31'19.1", Longitud 76°29'36.3" y en la cota 442 m.s.n.m. En general, Mala presenta clima variado: cálido durante los meses de enero a mayo y entre noviembre a diciembre; mientras que, se presenta templado en los meses de junio a octubre, con temperaturas máximas promedio de 26 a 32 °C y mínimas promedio entre 12 a 17°C, respectivamente. Los datos pluviométricos indican que las máximas precipitaciones alcanzan en promedio 6 mm mensuales durante los meses de enero a marzo.

4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y 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).

El alto riesgo en la zona costera de Perú, se ha incrementado desde los años 80 debido a que muchas de las ciudades y/o localidades han soportado procesos continuos de migración de población proveniente del interior del país y ante la falta de una adecuada planificación urbana y de acertadas políticas de planeamiento, los inmigrantes han ocupado zonas de riesgo ante la ocurrencia de peligros como los sismos, tsunamis y otros efectos secundarios. A estos escenarios, 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. Es común ver en algunas ciudades, como las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables sin medir su vulnerabilidad, pero si, 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 en el Perú (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.

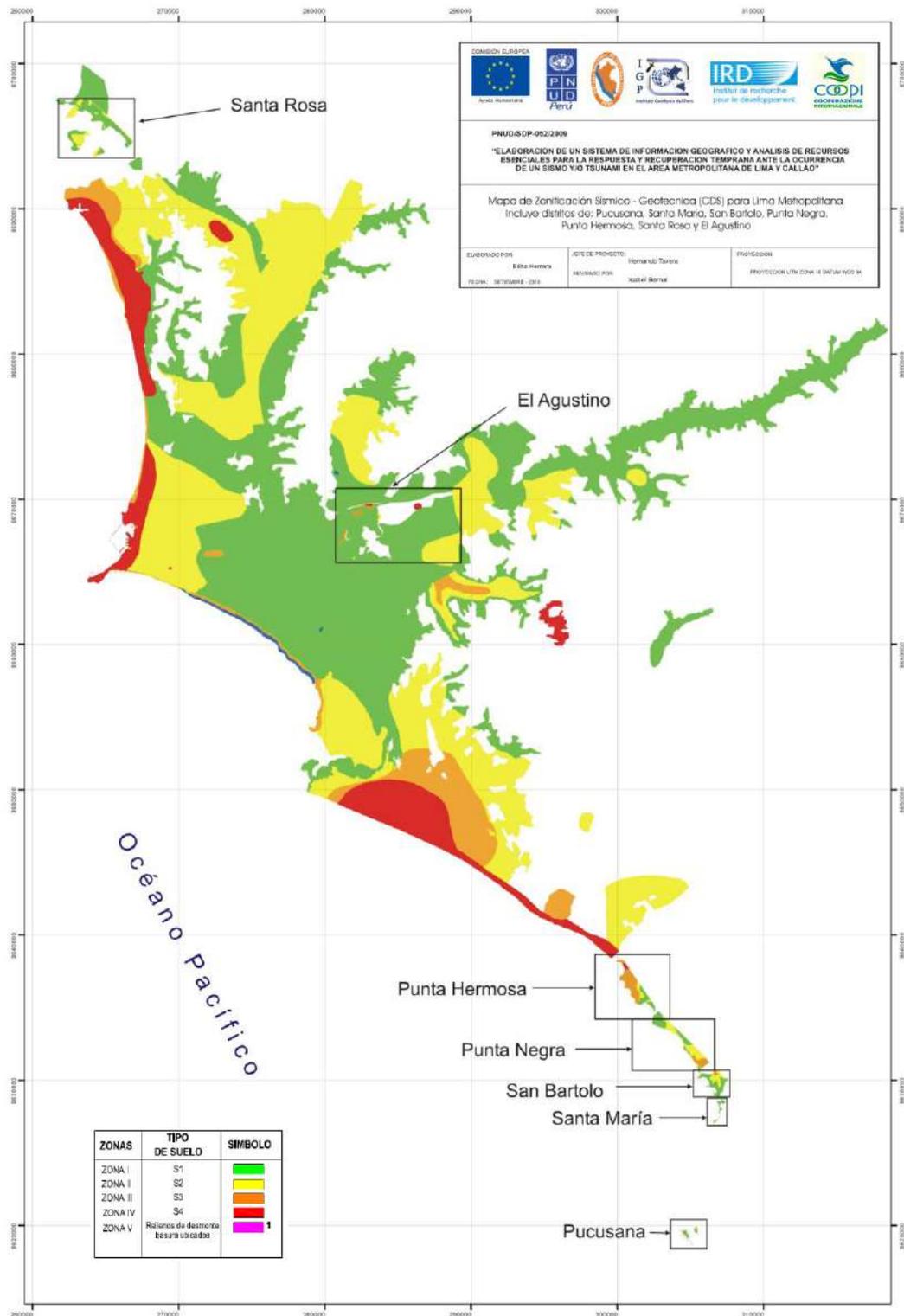


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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 en 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, estudios similares son realizados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca, Chala, Camaná, Arequipa, Punta de Bombón y Cocahacra, todas ubicadas en el departamento de Arequipa.

Durante el año 2015, el IGP realiza los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica en las ciudades de Asia, San Vicente de Cañete, Cerro Azul, Chancay, Huaral, Lunahuana y Mala en el departamento de Lima; además, de la ciudad de Casma en el departamento de Ancash. **Los resultados obtenidos para el área urbana de la Ciudad de Mala son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de la Ciudad de Mala”.**

4.1.- Estudios previos

Para el distrito y ciudad de Mala, se ha recopilado información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones, en razón que ella fue considerada de base para proyectar los objetivos del presente estudio, además de complementar los resultados a obtenerse. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene el siguiente:

Ministerio de Agricultura – Instituto Nacional de Recursos Humanos – INRENA (2007): *Evaluación de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Mala. Estudio hidrológico y de inventario de fuentes de aguas superficiales en la cuenca del río Mala. Se adjuntan los datos de 17 estaciones pluviométricas, 5 que registran temperaturas, 3 con información de evaporación, 5 de humedad relativa y 2 que registran velocidad de viento.*

En este estudio se concluye que, la precipitación media anual para la cuenca Mala, obtenida mediante el método de correlaciones, alcanza a 873.6 mm.

Considerando la precipitación areal alcanza a 670.8 mm y mediante la afectación altitudinal a 693.7 mm. Finalmente, se menciona que el río Mala presenta un caudal medio mensual de 16.761 m³/s, un valor máximo de 180.36 m³/s y un valor mínimo de 0.53 m³/s.

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 (Figura 4a). Cada uno de estos campos de investigación proveen de información básica sobre las observaciones de campo y la toma de datos 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 que deben realizarse son aquellos que considera la evaluación de elementos expuestos; es decir, conocer el tipo, la calidad y edad de las construcciones; además, de capacidad de respuesta de los tomadores de decisiones, así como de la misma población. Para estos últimos actores, es importante su participación y compromiso con los simulacros que a nivel nacional realiza INDECI, ellos deben ser replicados en las familias, colegios, universidades y empresas, cualquiera sea su razón social (Figura 4b).

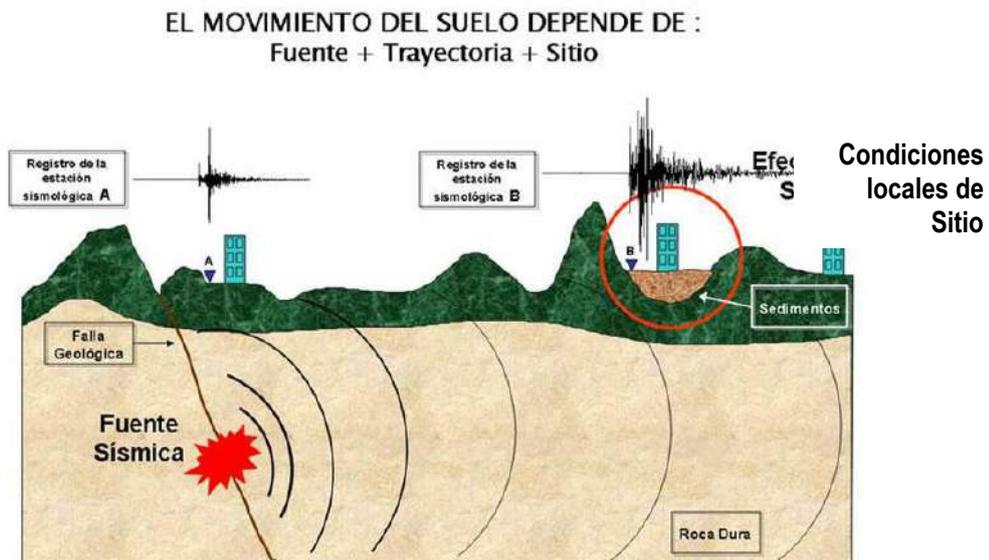


Figura 4a: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.



Figura 4b: Simulacro de sismo a cargo de la Municipalidad de la ciudad de Mala

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 (2016)”. 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 en el área urbana de la ciudad de Mala se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de sismicidad

Se hace uso del catálogo y Mapa Sísmico del Perú para describir las características sísmicas de la región en donde se encuentra el distrito y ciudad de Mala (Tavera, 2014). Se describe las características de la sismicidad y de los sismos de mayor magnitud e intensidad ocurridos en la región a fin de comprender el porqué de los daños producidos por estos eventos durante el periodo histórico e instrumental. Para la sismicidad histórica se analiza la información contenida en Silgado (1978) y Dorbath et al, (1990), y la instrumental, a partir de la proporcionada en los reportes técnicos elaborados por la Unidad de Sismología de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

7.2 Estudios de peligro sísmico

Este tipo de estudios considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida el área de estudio en un determinado periodo de tiempo, por ejemplo en 500 años de exposición. Para tal objetivo, 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). Los resultados permiten obtener mapas de iso-aceleraciones probabilísticas, siendo de importancia para proyectar el diseño de cualquier obra de ingeniería que pueda estar, en el futuro, expuesta a una demanda sísmica.

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 las áreas de interés 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 como la elaboración de calicatas, perforaciones, ensayos de mecánica de rocas, etc. Estos estudios se realizan con la finalidad de conocer los parámetros geotécnicos que ayudan al diseño de cimentaciones para estructuras tales como viviendas, edificios, puentes, carreteras, taludes, presas, etc. También permite identificar y solucionar problemas de asentamientos de suelos, 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:

.- **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 (Figura 5).

.- **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.



Figura 5: Equipos, accesorios y técnica de DPL

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 6).

En la Figura 7, 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 MA-298 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en MA-34, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.



Figura 6: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en la ciudad de Mala: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

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 8), 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.

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. Luego se procede a

identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

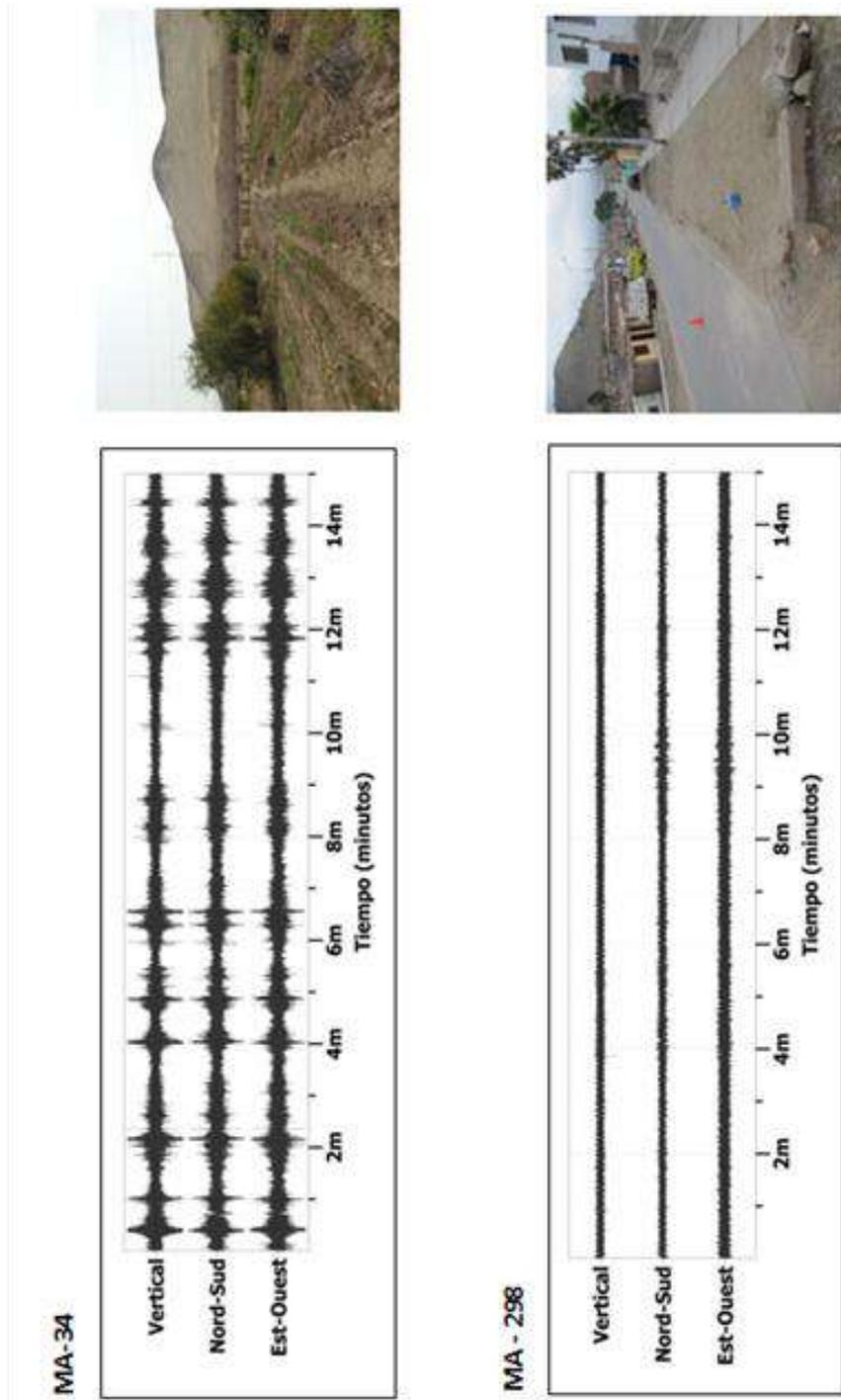


Figura 7: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (MA-298) y otro con ruido transitorio (MA-34). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

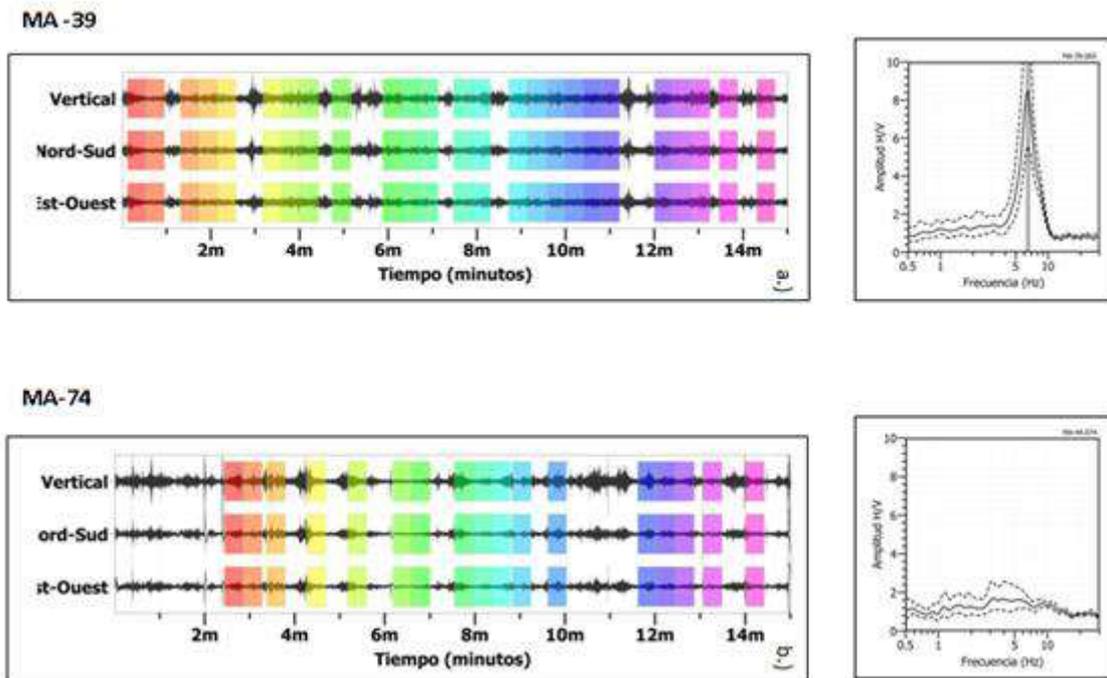


Figura 8: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. MA-39: Registros y razón H/V donde se identifica la presencia de un pulso predominante de gran amplitud. MA-74: Registros y razón H/V en el cual no se observa picos predominantes. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas 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. 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 (Figura 9).

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.

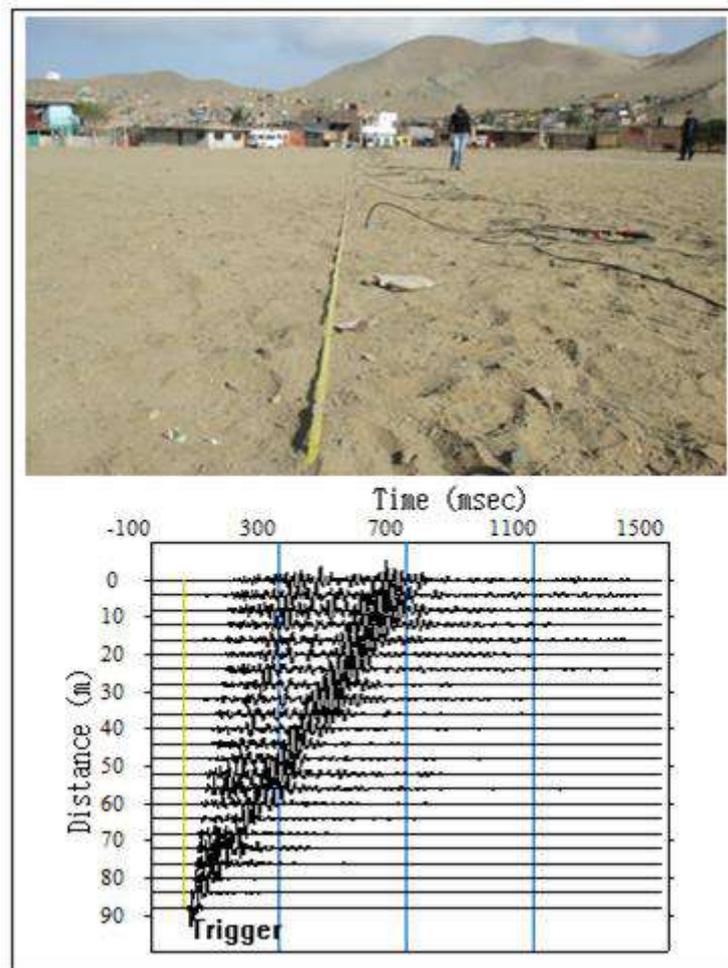


Figura 9: Disposición del equipo de refracción sísmica y trazas obtenidas en la ciudad de Mala

.- **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 10).

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 10: Disposición del equipo de prospección eléctrica en la ciudad de Mala

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

El distrito y la ciudad de Mala se encuentran ubicados en el borde occidental de la región central 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, ya que puede presentarse el escenario de que sismos de gran magnitud generen tsunamis. Del mismo modo, se debe estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud a fin de que sean considerados en los nuevos proyectos asociados al desarrollo urbanístico de la ciudad.

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 central 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, y una de estas ciudades es Mala (Figura 11).

Según información histórica, los sismos que probablemente causaron daño y destrucción en el área urbana de Mala fueron los siguientes (Silgado, 1978):

- .- Los Terremotos de Lima y Callao de 1687, ocurrieron el 20 de octubre de 1687, asolando toda la costa central del Perú, entre Chancay y Pisco. Fueron dos sismos de gran intensidad, el primero se produjo a las 4:15 de la mañana y el segundo a las 5:30 aproximadamente, al que siguió un tsunami que arrasó el puerto del Callao y otras localidades costeras. En Lima murieron unas 100 personas, aparte de otras en varias localidades costeras ubicadas entre Chancay y Pisco. Estas mismas localidades habrían sido también inundadas por el mar, a punto tal que muchos de sus habitantes tuvieron que trasladarse y refundarse a una legua del mar.*

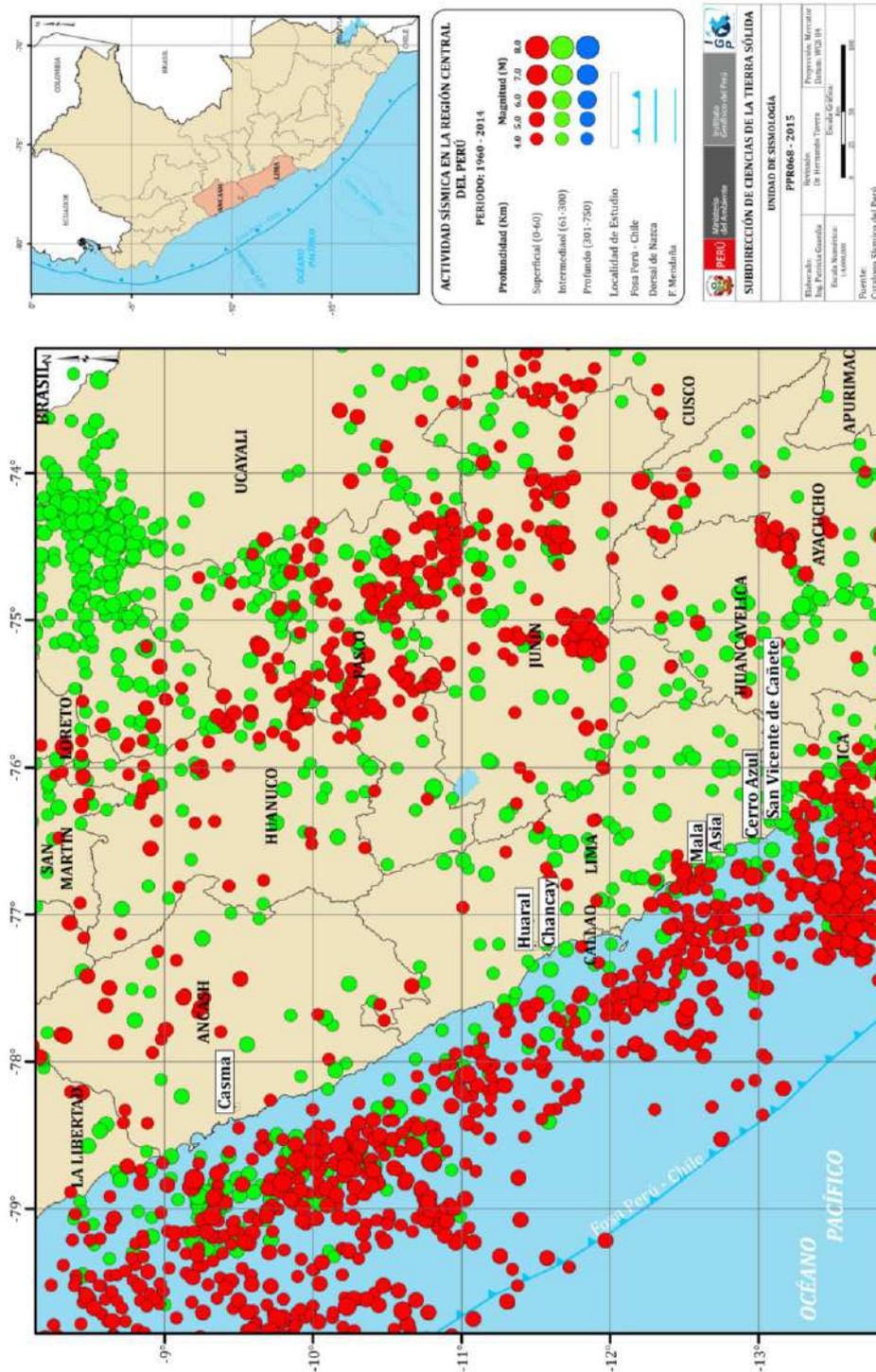


Figura 11: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región central del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

- En 1966, otro terremoto con epicentro frente a la zona costera de Chancay causó graves daños al llamado Norte Chico, y en el área de Lima-Callao. El terremoto se sintió fuerte en la zona sur de Lima hasta la ciudad de Cañete. En la catedral del Callao, mientras se celebraba una ceremonia 24 personas murieron al caer

parte de paredes, también se produjo un moderado tsunami que causó graves daños en el Callao y en Pucusana. En total el sismo cobró 200 vidas, de las cuales 100 murieron en Lima-Callao.

- .- Recientemente, en el año 2007 el departamento de Ica y la provincia de Cañete fue afectada por un sismo de gran magnitud que ocasionó daños en muchas viviendas en Mala, además de un tsunami que produjo daños parciales a bienes de propiedad de los pescadores locales. Este sismo y tsunami deben ser considerados por las autoridades y población en general, como el preámbulo de escenarios mayores de podrían generar sismos de mayor magnitud y con epicentros cercanos a la ciudad. Es importante que la población de Mala comprenda que los sismos y tsunamis son cíclicos en el tiempo y la única manera de sobrevivir es preparándose a fin de hacerse menos vulnerable. El sismo del año 2007 produjo en la ciudad de Mala intensidades del orden de VI-VII en la escala de Mercalli Modificada, produciéndose daños en viviendas construidas con material de adobe y/o muy antiguas (Figura 12).*

En la actualidad, del total de sismos que ocurren en Perú cada año, el 70% presentan sus epicentros en la zona costera y de ellos, cerca del 40% ocurren frente a la costa sur de los departamentos de Lima e Ica, afectando en todos los casos a la ciudad de Mala con diversos valores de intensidad sísmica. Según la historia sísmica de los departamentos de Lima e Ica, son muchos los terremotos que en el pasado afectaron a sus diversas ciudades y localidades, entre ellas la ciudad de Mala por encontrarse cercana a la línea de costa. Sin embargo, no existen reportes que detalle estos sucesos y ello podría deberse a su escasa o dispersa población en varios núcleos urbanos desde su creación.

Por otro lado, en la Figura 13 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo histórico (1400 – 1900) e instrumental (1961 – 2014), observándose que la zona costera de la región central fue afectada en el pasado por sismos que produjeron intensidades del orden de X-XI (MM); por lo tanto, Mala es una ciudad expuesta a alto riesgo para el caso de sismos. Asimismo, en informe reciente elaborado por Tavera (2014), se indica que de acuerdo al monitoreo de la actividad sísmica y deformación cortical (datos de GPS), se ha identificado en el borde occidental de la región central del Perú la existencia de dos importantes asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico que darían origen, en un futuro, a un sismo de

magnitud del orden de 8.5 Mw (A-1 en la Figura 14). Esta información es corroborada por estudios realizados por Villegas-Lanza et al (2015) sobre la distribución de asperezas en el borde occidental del Perú.

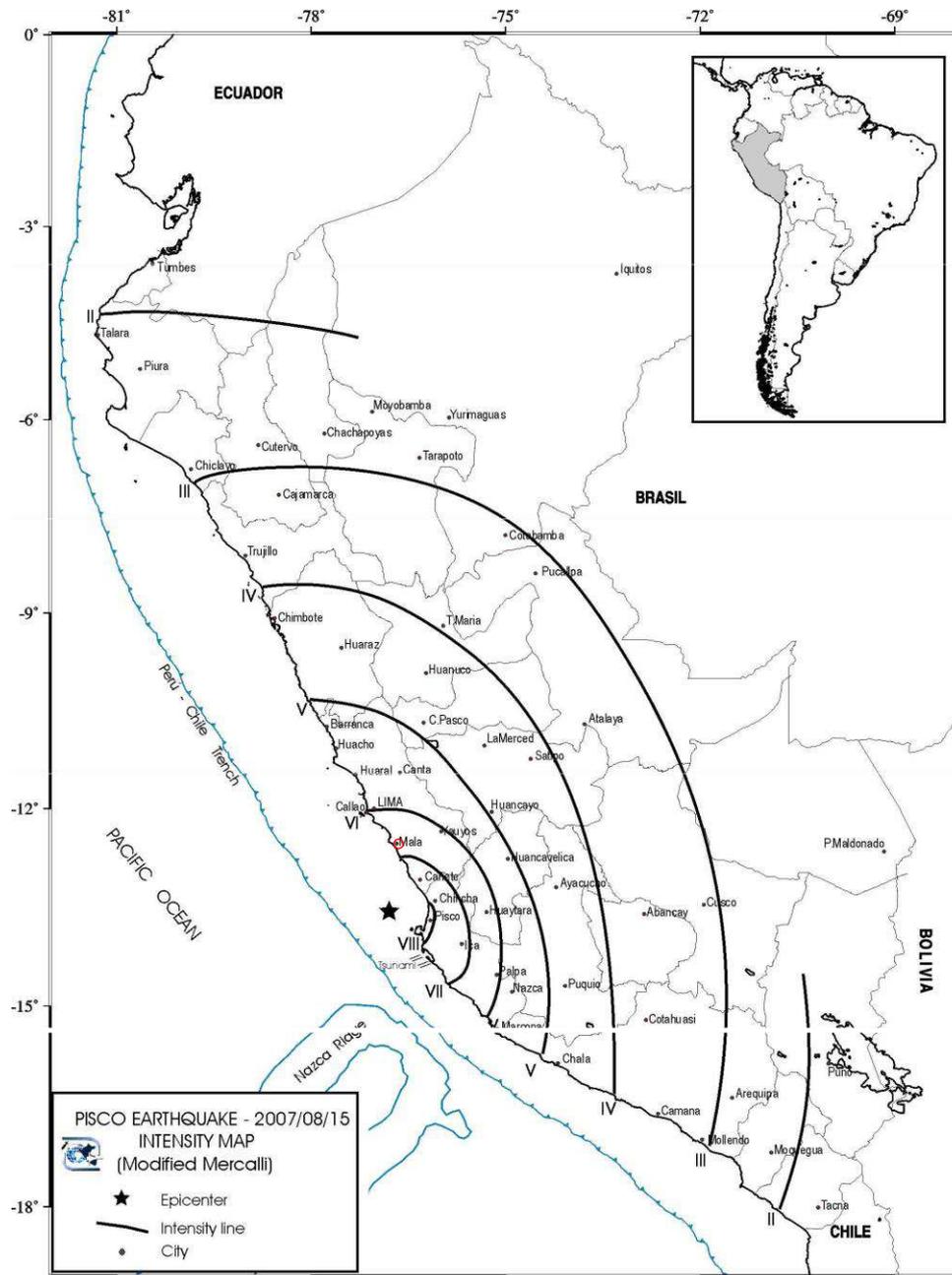


Figura 12: Mapa de isosistas para el terremoto del año 2007 que afectó a la ciudad de Mala con intensidades del orden de VI-VII en la escala de Mercalli Modificada

De acuerdo a estos estudios, el sismo sería comparable al ocurrido en el año 1746 y que afectó con intensidades mayores a VIII (MM) a todas las ciudades y/o localidades ubicadas en la zona costera, desde Arequipa por el sur, hasta Chiclayo por

el norte. En este escenario, la ciudad de Mala podría soportar intensidades del orden de VIII (MM), pudiendo afectar a un gran número de viviendas de la ciudad. A fin de tener información más cuantitativa sobre los posibles daños a presentarse en la ciudad de Mala, se debe complementar los resultados a obtenerse en este estudio con evaluaciones catastrales y estructurales.

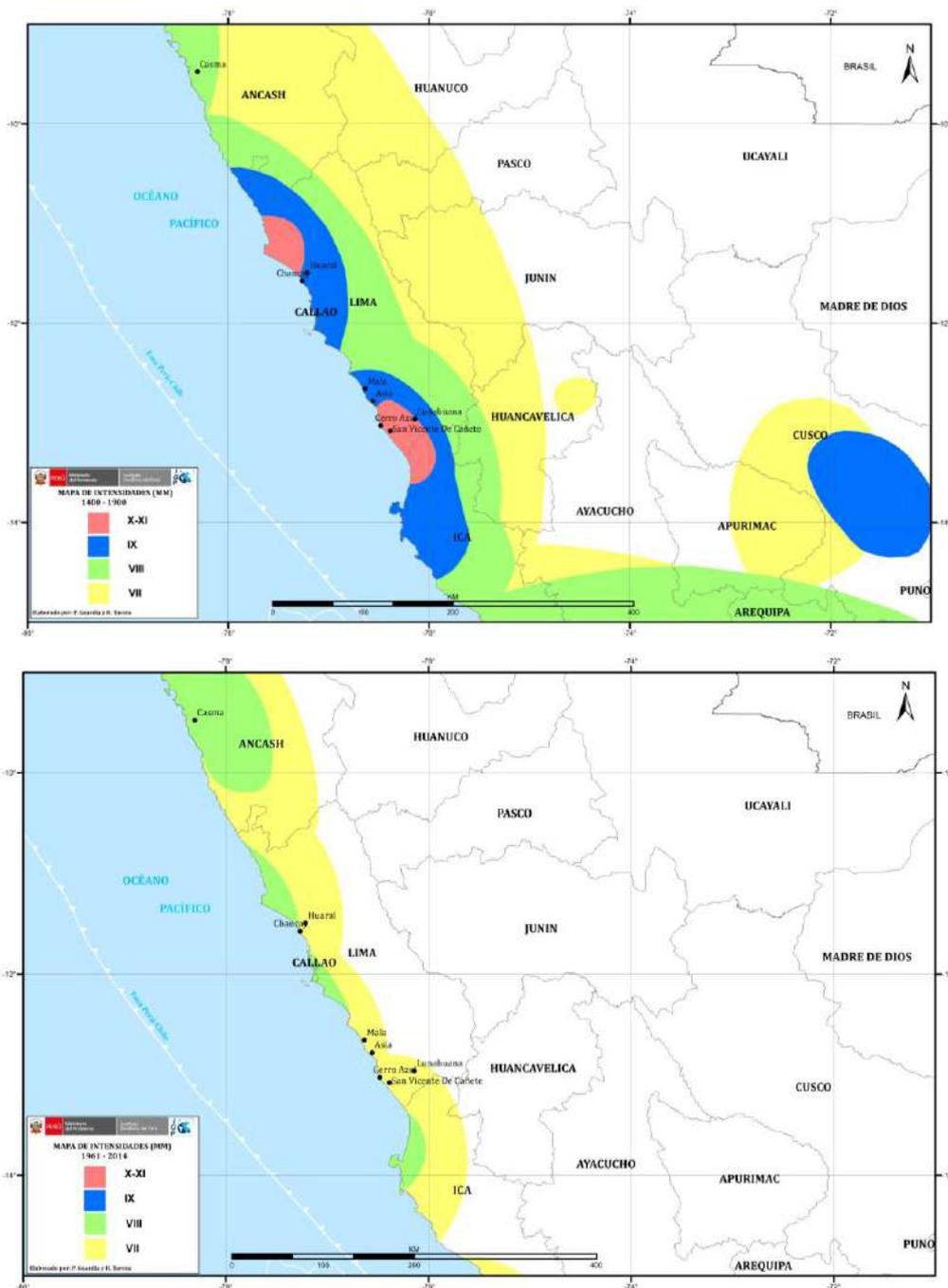


Figura 13: Mapas de isosistas (MM) correspondientes a sismos históricos (1400 – 1900) e instrumentales (1961 – 2014) ocurridos en el borde occidental de la región central del Perú

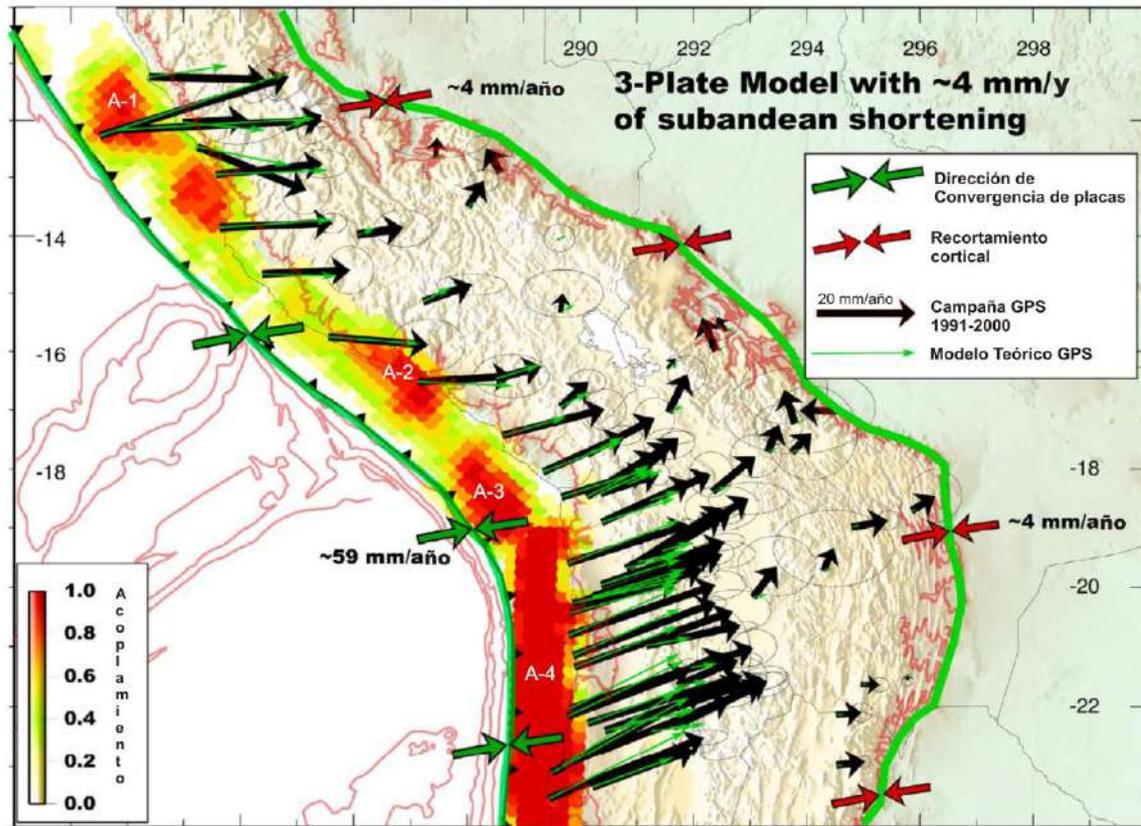


Figura 14: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de 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 y 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 Mala se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 380 a 420 gals (Figura 15), equivalentes a intensidades del orden de VII-VIII (MM); es decir,

suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos.

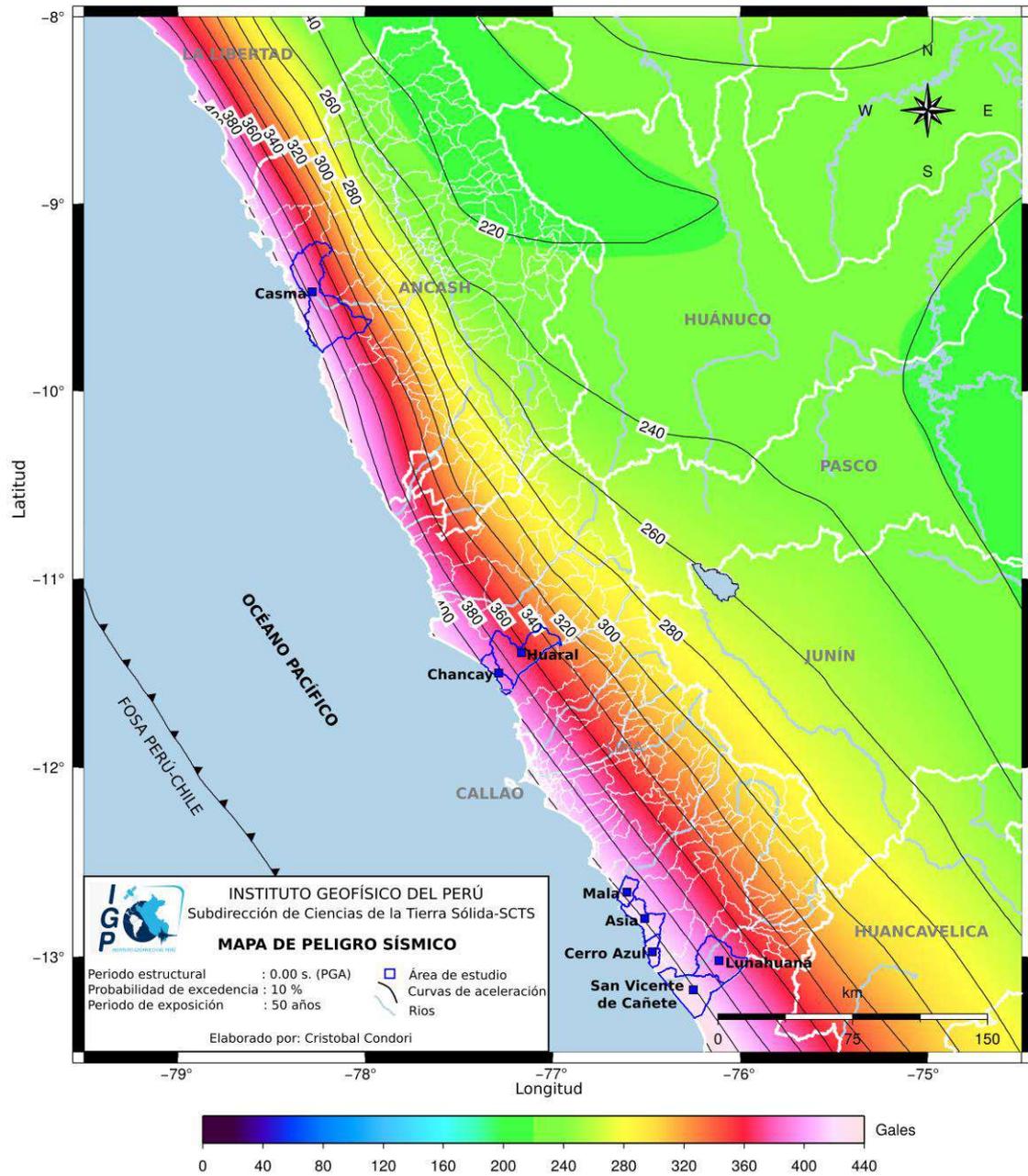


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un período de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Mala 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 a la topografía de terreno y al 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 verificados y validados durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Mala. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida para un área de 22 km², y que permite concluir que la zona urbana de la ciudad de Mala se asienta sobre una terraza aluvial con altitudes entre 40 y 100 msnm; mientras que, en los alrededores, hacia el extremo noreste de la ciudad, se observan relieves que alcanzan alturas de hasta 160 m.s.n.m. con respecto al área urbana (Figura 16).

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en razón que influye en la formación de los suelos y condiciona el proceso erosivo, cuanto más pronunciada sea pendiente, la velocidad del agua de escorrentía será mayor, no permitiendo la infiltración del agua en el suelo (Belaústegui, 1999). El mapa de pendientes para la ciudad de San Vicente de Cañete fue desarrollado a partir del MDT y para la clasificación de los rangos de pendientes se utilizó como fuente el Boletín N° 29 Serie C publicado por INGEMMET (2006). Según esta información, la ciudad de Mala se encuentra asentada sobre una terraza aluvial que presenta pendientes menores a 5°; mientras que, hacia el extremo NE, en el A.H. Dignidad Nacional las lomadas presentan pendientes superiores a 25° (Figura 17).

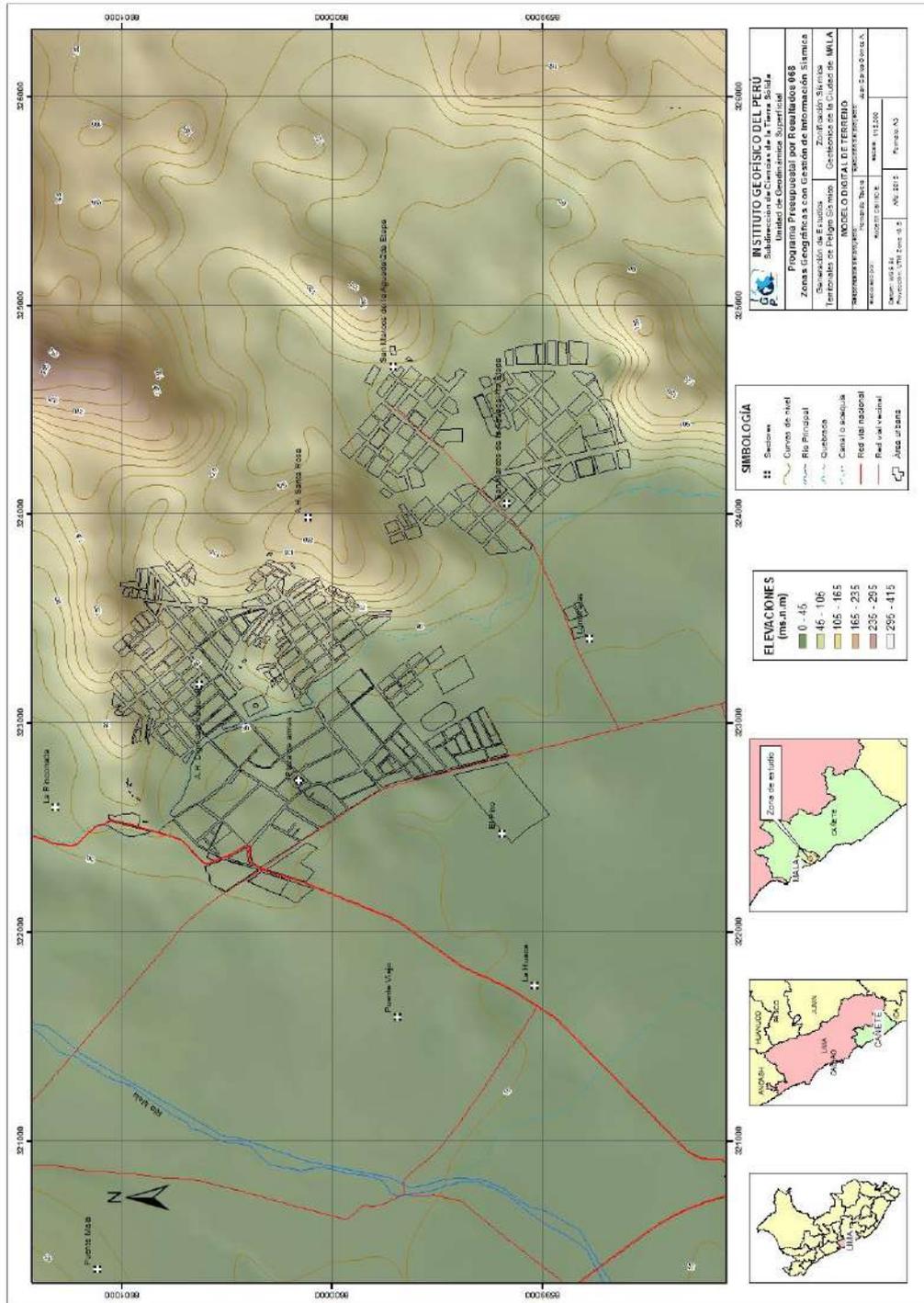


Figura 16: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Mala y alrededores

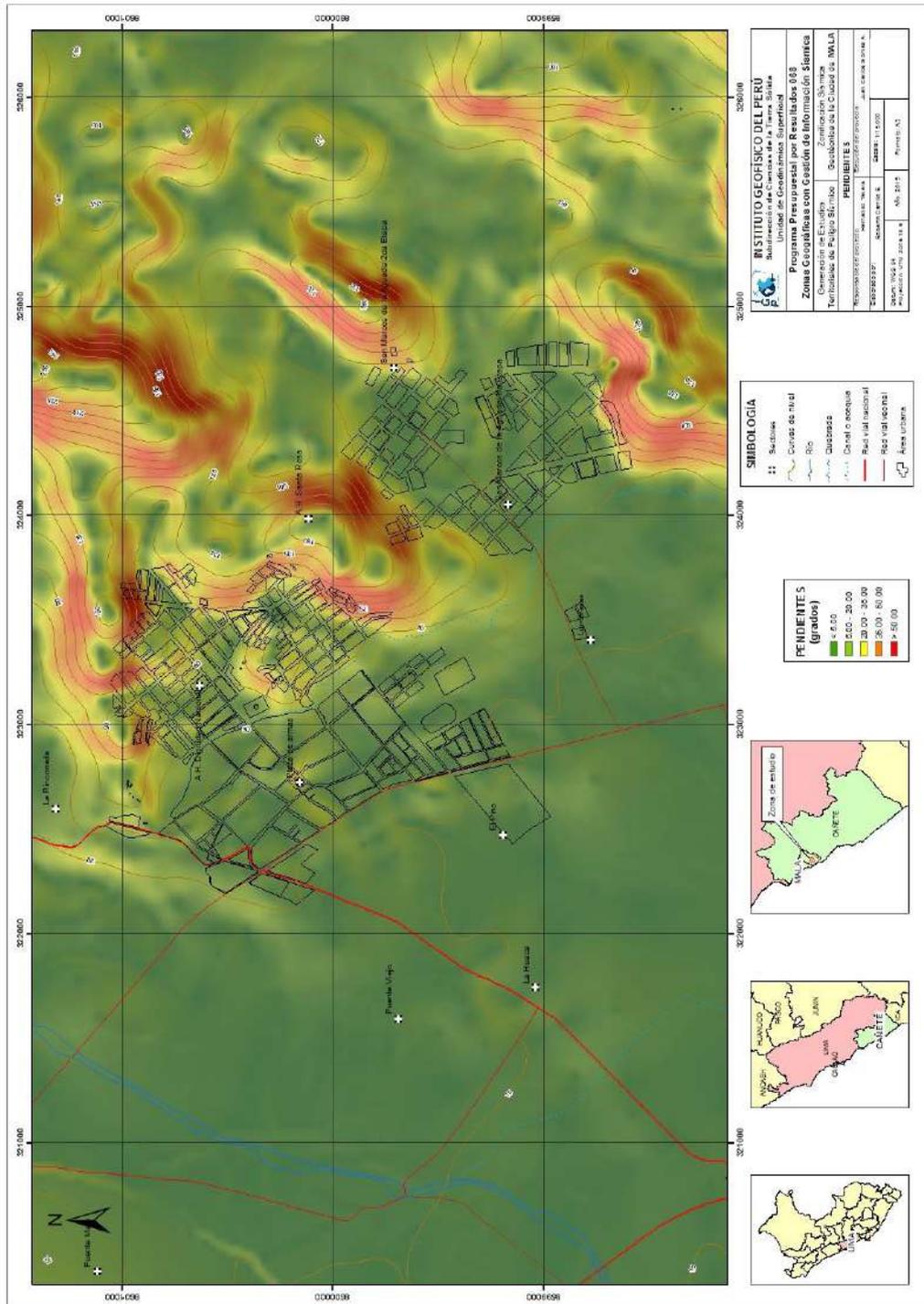


Figura 17: Mapa de pendientes para la ciudad de Mala y alrededores

9.1.1.1.- Origen denudacional

Todas las tierras emergidas, sean por procesos orogénicos o epirogénicos, constituyen el estado inicial de un gran ciclo de denudación, el mismo que comprende un conjunto de procesos (meteorización y/o erosión) que determinan la degradación o erosión de la superficie del terreno. Los procesos de denudación actúan sobre cualquier tipo de roca sin considerar su estructura o composición, y a la vez aceleran o retardan los procesos de desgaste de la misma. En la ciudad de Mala se ha desarrollado el modelado de geformas en rocas intrusivas debido al accionar de agentes como el agua y el viento, dando lugar a la formación de colinas y lomadas.

*.- **Colinas:** Corresponden a elevaciones del terreno cuyo relieve presenta pendientes menores a 25°. Se caracterizan por presentar configuración basal redondeada y vértices divergentes en todas las direcciones a partir de la cima o cumbre. Hacia el extremo norte del área urbana de Mala, específicamente en el A.H Dignidad se identifica la presencia de una colina de 75 m.s.n.m. de altitud y sobre ella, asentadas algunas viviendas y un estanque de agua, Figura 19.*



Figura 19: Colina ubicada en el extremo norte de la ciudad de Mala conformada por rocas intrusivas tipo tonalitas y granodioritas. Obsérvese la presencia de viviendas y de un tanque de agua.

*.- **Lomas:** Corresponden a elevaciones del terreno con desniveles de hasta 300 m, y pendientes menores a 30°. Se caracterizan por tener configuración basal alargada y dos vertientes que se inclinan en dirección opuesta. Estas unidades están presentes en los extremos norte y noroeste de los sectores A.H Dignidad Nacional, A.H. Santa Rosa y San Marcos de la Aguada con elevaciones entre 90 y 300 m.s.n.m, aproximadamente, Figura 20.*



Figura 20: Lomas ubicadas en el extremo norte y noreste de la ciudad de Mala. Unidades conformadas por rocas intrusivas tipo tonalitas y dioritas.

9.1.1.2.- Origen depositacional

Comprende geoformas resultantes por la depositación de fragmentos o sedimentos originados durante los procesos de erosión de rocas preexistentes, y cuyos materiales han sido transportados y acumulados en áreas geográficas de baja pendiente. Esta unidad geomorfológica se encuentra relacionada a la dinámica aluvial y sobre cuya terraza se encuentra asentada la ciudad de Mala.

*.- **Terraza aluvial:** Superficie horizontal o ligeramente inclinada con pendientes menores a 7° y conformada por materiales heterogéneos (clastos angulosos a redondeados envueltos en una matriz arenosa y/o fina) de origen intrusivo. Estos materiales han sido erosionados de las lomadas ubicadas en los extremos norte y noreste de la ciudad, luego transportados por las escorrentías y posteriormente depositados en una zona de menor pendiente. En la ciudad de Mala se han*

diferenciado dos terrazas aluviales eb base a su composición litológica y al desnivel existente entre ambas. **La terraza aluvial 1** conformada por materiales areno-limosos se ubica en la parte baja de la ciudad (sectores noroeste y suroeste de Mala) y sobre la cual, se desarrollan labores agrícolas, Figura 21.



Figura 21: Terraza aluvial 1 (línea roja) ubicada en los sectores noroeste y suroeste de la ciudad de Mala (Lumbreras, La Huaca y Pte. Viejo) con predominio de actividades agrícolas. Terraza aluvial 2 (línea amarilla) sobre la cual se asienta el área urbana de la ciudad de Mala

La terraza aluvial 2 sobre la cual se asienta el área urbana de la ciudad de Mala, estando constituida por materiales heterogéneos que comprenden gravas, arenas y arenas limosas. En el extremo NE de la ciudad, la unidad presenta un desnivel aproximado de 7 m respecto a la terraza aluvial 1, Figura 22.



Figura 22: Terraza aluvial 2 sobre la cual se asienta el área urbana de la ciudad de Mala

9.1.1.3.- Origen fluvial

Comprende al más importante de todos los agentes modeladores que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía cuya dinámica comprende las siguientes etapas: erosión, transporte y sedimentación. 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). Las geoformas resultantes generalmente se encuentran relacionadas a la presencia de los ríos que se comportan esencialmente como agentes de erosión y transporte de sedimentos procedentes del continente, hasta desembocar en los océanos. Los materiales son transportados principalmente, teniendo en cuenta el tamaño y peso de los materiales, los grandes y pesados bloques son dejados muy cerca del lugar de origen o "in situ", los de menor peso son llevados lejos de su origen, mientras que las partículas finas en suspensión y/o solución son transportadas hasta depositarse en los fondos de lacustres o marinos. También, la sedimentación se produce en las depresiones de los cursos fluviales (lecho fluvial), en los cambios de pendiente y/o partes convexas o internas de los meandros (llanuras de inundación).

*.- **Lecho fluvial:** Corresponde a un canal excavado por el flujo de agua de un río y los sedimentos que éste transporta durante todo su desarrollo y evolución. La morfología del lecho depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato; es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte. Esta unidad ha sido identificado en el extremo noroeste del distrito de Mala y sobre el lecho fluvial del río Mala, el mismo que se caracteriza por presentar meandros y por estar cubierto por materiales granulares (gravas subredondeadas y redondeadas en matriz arenosa), Figura 23.*

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:



Figura 23: Lecho fluvial del río Mala (líneas amarillas). Su cauce meándrico se encuentra conformado por gravas y arenas

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 “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, ingeniería sísmica, entre otros. En el presente estudio, se hace incidencia en el reconocimiento de las formaciones geológicas (litologías) y depósitos del cuaternario en la ciudad de Mala y alrededores.

9.2.1- Geología regional

Para describir las principales unidades geológicas, se tomó como base la información regional descrita por Salazar y Landa (1993) a escala 1/100000. Estos

autores describen las unidades litológicas aflorantes en las inmediaciones de la zona de estudio, las mismas que comprenden rocas con edades entre el Cretácico Superior hasta el Cuaternario Reciente. Estas rocas intrusivas, compuestas por rocas tonalitas y dioritas (Ks-je/to), descansan bajo unidades Cuaternarias compuestas por depósitos fluviales (Qh-fl), depósitos aluviales 1 (Qh-al1) y depósitos aluviales 2 (Qh-al2), todos compuestos por materiales heterogéneos de gravas redondeadas a subredondeadas envueltas en una matriz arenosa y/o limosa, Figura 24.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Aluviales 1 Qh-al1  Dep. Aluviales 2 Qh-al2  Dep. Fluviales Qh-fl 	
	PALEÓGENO			
MESOZOICO	CRETACEO	Superior		SUPER UNIDAD JECUAN Tonalita Ks-jo-te  Diorita Ks-jo-te 

Figura 24: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades aflorantes en la ciudad de Mala

9.2.2- Geología local

In situ, se procedió con el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de San Vicente de Cañete a escala 1:15,000, sobre un área de 22 km² aproximadamente (Figura 25). A continuación se describen las principales características de estas unidades estratigráficas.

9.2.2.1.- Superunidad Jecúan: Está representada por rocas intrusivas tipo granitos, tonalitas, granodioritas y dioritas. En la ciudad de Mala afloran las siguientes rocas:

Dioritas (Ks-jo-te): constituyen la base del Cretáceo Superior y están conformadas por rocas del mismo nombre. Se presentan con textura porfirítica (composición mineralógica visible) y los minerales que presenta son: ortosas, plagioclasas, entre otros. Esta unidad aflora en el extremo norte del distrito de Mala, específicamente conformando la colina que se ubica a 580 m al oeste del A.H Dignidad Nacional, Figura 26.



Figura 26. Dioritas que afloran en el extremo norte de Mala conformando la colina que se ubica a 580 m del A.H Dignidad Nacional.

Tonalitas (Ks-jo-te), constituye la base del Cretáceo Superior y están conformadas por tonalitas que se presentan con textura porfirítica y tonalidades claras. Esta unidad aflora en las inmediaciones del distrito de Mala, Figura 27.



Figura 27: Tonalitas que afloran en el flanco oriental de la zona urbana de Mala (sectores Santa Roza y San Marcos de la Aguada)

9.2.2.2.- Depósitos cuaternarios: Estos depósitos cuaternarios de edad Holocena se encuentran suprayaciendo al substrato rocoso, siendo sus características las siguientes:

Depósitos fluviales: Materiales resultantes de la meteorización y/o erosión, traslado y depositación de rocas preexistentes. Fueron transportados por una corriente fluvial permanente, encontrándose depositados en el cauce de los lechos de los ríos existentes en el área estudiada. Están conformados mayormente por materiales gravosos, con partículas de diversos diámetros, generalmente se presentan envueltos en una matriz arenosa o areno-limosa. Estos depósitos se encuentran distribuidos a lo largo del cauce del río Mala, están conformados por gravas y arenas, llegando a presentar clastos de hasta 4” de diámetro, debido a la gran energía con que las aguas se desplazan (caudal)
Figura 28.



Figura 28: Depósitos fluviales (líneas amarillas) ubicados en sectores contiguos al cauce del río Mala.

Depósitos aluviales: Corresponden a materiales resultantes de los procesos de erosión vinculados a los cauces de las quebradas, siendo transportados aguas abajo y depositados en zonas de menor pendiente (terrazas). Están constituidos por gravas heterogéneas conformadas por clastos angulosos y subredondeados que se encuentran envueltos en matriz arenosa y/o limosa. En Mala se ha

distinguido hasta dos depósitos aluviales diferenciados por su origen y composición:

Los depósitos aluviales 1 (Qh-al1) se encuentran relacionados a la dinámica de quebradas y la intervención del río Mala (transporte y depositación de materiales en los márgenes), estando conformados por gravas con diámetro mayor a 4", arenas y limos. Estos depósitos se encuentran en las inmediaciones de los sectores La Rinconada, Puente Viejo, La Huaca y Lumbreras; así como, en las inmediaciones del río Mala, Figura 29.



Figura 29: Depósitos aluviales 1 (Qh-al1) sobre la cual se realizan labores agrícolas

Los depósitos aluviales 2 (Qh-al2) se encuentran relacionados con la dinámica de quebradas antiguas, estando conformados por gravas arenosas con diámetros variables (menores a 4") y espesores mayores a los 10 m. Estos depósitos están presentes en el área urbana de Mala y en el AH San Marcos de la Aguada. Estos depósitos vienen siendo utilizados como agregados (materiales de construcción), Figuras 30 y 31.



Figura 30: Depósitos aluviales 2 (Qh-al2) sobre los cuales se asienta la ciudad de Mala. Sector La Rinconada.



Figura 31: Depósitos aluviales 2 usados como agregados para construcción (canteras), extremo NE de San Marcos de La Aguada

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.

- 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.

Los eventos geodinámicos predominantes en la ciudad de Mala son de origen antrópico como los movimientos de masa del tipo caída de rocas (Figura 32).

9.3.1.- Movimientos en masa

Corresponden a eventos geodinámicos que se desarrollan ladera abajo como la caída de rocas, detritos o tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Para la descripción de los movimientos en masa se ha tomado en cuenta la clasificación de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), la misma que se basa en considerar el tipo de movimiento y el material desplazado. En cuanto al primero se consideran 5 clases: caída, volcamiento, deslizamiento, flujo y propagación lateral; mientras que, para el segundo se tiene rocas y suelos (divididos en detritos y tierras). Para la ciudad de Mala se ha identificado el desarrollo de eventos como la caída de rocas y sus características son:

- Caídas de rocas: Este tipo de eventos considera clastos o fragmentos de rocas preexistentes que se desprenden de una ladera como resultado de procesos de erosión y meteorización, ya sea de origen natural o antrópico. En la ciudad de Mala, específicamente a 580 m al oeste del A.H Dignidad Nacional,



Figura 33: Zona de caída de rocas y detritos de origen antrópico generados por la presencia de un tanque de agua en la cima de la colina ubicada en el extremo norte de la ciudad de Mala..

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 Mala se recolectó información según las siguientes técnicas:

.- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Mala se construyeron 9 calicatas (Tabla 1), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.50 metros y la mínima de 3.00 metros (ver Anexos). En la Figura 34 se muestra la distribución espacial de las calicatas.

Tabla 1: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas (NP= no presenta)

CALICATA	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
CA - 01	322558	8601172	55	3.20	N.P.
CA - 02	322652	8600450	49	3.00	N.P.
CA - 03	323801	8600873	106	3.50	N.P.
CA - 04	323628	8600319	105	3.50	N.P.
CA - 05	322250	8599490	37	3.20	N.P.
CA - 06	323115	8599417	36	3.50	N.P.
CA - 07	322811	8599156	36	3.00	N.P.
CA - 08	324334	8599688	78	3.10	N.P.
CA - 09	324417	8598783	69	3.50	N.P.

.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó ensayos de campo aplicando el método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales (ver Anexo). Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 2 se presenta los resultados obtenidos en cada punto de observación y que sirven para identificar las condiciones naturales del terreno (compactación y humedad), información necesaria para desarrollar los ensayos de corte directo en las muestras de suelo en su estado inicial. Para la ciudad de Mala solo se ha realizado pruebas de densidad en las calicatas CA-06 y CA-08.

Tabla 2: Valores de densidades de suelo in situ

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
CA - 06	DC-CA - 06	2.00	1.33	1.31
CA - 08	DC-CA - 08	3.10	1.58	1.58

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 10 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 3), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 2.80 metros y la mínima del orden de 0.30 metros (ver Anexos), debido principalmente a que los suelos son granulares con mayor presencia de gravas. Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existe información geotécnica a fin de tener mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Mala.

Tabla 3: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos y clasificación SUCS

POSTEOS	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROF.(m)	TIPO DE SUELO (SUCS)	NIVEL FREÁTICO A (m)
POST - 01	322564	8601174	149	0.40	SM	N.P.
POST- 02	322500	8600613	35	0.70	SM	N.P.
POST - 03	323187	8600598	76	2.80	SP	N.P.
POST - 04	322793	8600119	50	1.10	OL	N.P.
POST- 05	322741	8599634	43	0.30	SM	N.P.
POST- 06	322899	8599580	43	0.35	SM	N.P.
POST - 07	323339	8599904	67	0.90	SP	N.P.
POST - 08	323216	8599247	--	1.10	SP	N.P.
POST - 09	322989	8598684	--	0.30	SM	N.P.
POST - 10	324054	8599177	62	0.50	SP	N.P.

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 9 puntos dentro de la ciudad de Mala (Tabla 4). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de .05 metros y mínima de 0.16 metros debido a que los suelos son granulares de origen aluvial (gravas, arenas y arcillas limosas) con ángulos de fricción de 27° a 29° en promedio (ver Anexos). Asimismo, se ha determinado que los suelos tipo arena mal graduada presentan valores de ángulo de fricción

mayores a 35° y los suelos tipo arena limosa presentan valores menores a 35°, lo que indica suelos de consistencia media a baja.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la ubicación y profundidad de los ensayos de penetración ligera

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROF. (m)	NÚMERO DE GOLPES	ϕ
DPL-01	322570	8601170	200	0.16	35	37.3
DPL-02	322508	8600612	73	1.00	38	38.0
DPL-03	323192	8600600	79	0.25	35	37.3
DPL-04	322607	8600004	50	0.28	40	38.5
DPL-05	322796	8600121	50	2.80	17	32.4
DPL-06	322741	8599632	41	0.35	30	36
DPL-07	323217	8599247	37	0.28	40	38.5
DPL-08	322983	8598682	32	0.24	35	37.3
DPL-09	324238	8599515	71	1.05	26	35.0

ϕ = Ángulo de fricción interna

10.1.- 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 Mala. Para esta ciudad se ha identificado la existencia de 6 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 35 y Tabla 5):

- Suelos tipo GW: Están conformados por gravas bien graduada y con poco contenido de material fino (1.7%). Su contenido de humedad es de 2.80 %, constituyen suelos con grado de compactación medio y no presenta plasticidad (debido al poco contenido de material fino). Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 9 % del área de estudio y han sido identificados en la calicata CA-05, ubicada a 820 m al SE de la plaza de la ciudad de Mala.

- Suelos tipo GP: Están conformados por gravas mal graduadas. Su contenido de humedad es de 3.10 % a 4.70 %, constituyen suelos con grado de compactación bajo a medio y no presenta plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 18 % del área de estudio y han sido identificados en las calicatas CA-01, CA-02 y CA-07, margen derecho de la Av. Panamericana antigua, ocupando los sectores de La Rinconada, parte central de Mala y en las inmediaciones del Pino.

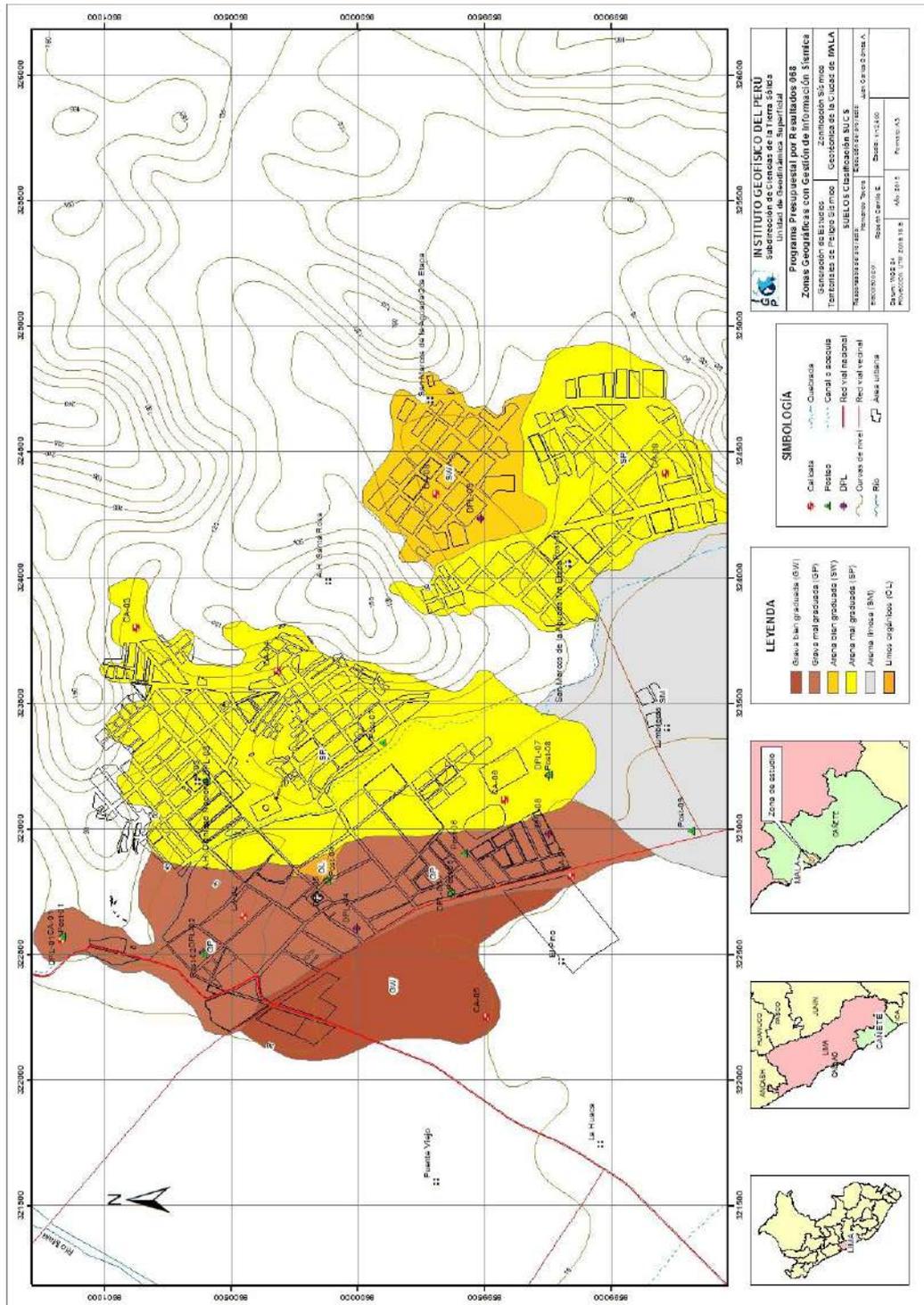


Figura 35: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Mala y alrededores

Tabla 5: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Mala (N.P. = no presenta)

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074 mm)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
CA - 01	3.20	N.P	68	30	2	N.P	N.P	N.P	4.70	GP	Grava pobremente graduada
CA - 02	3.00	N.P	70	26	4	N.P	N.P	N.P	3.50	GP	Grava pobremente graduada
CA - 03	3.50	N.P	6	85	9	N.P	N.P	N.P	0.51	SP	Arena mal graduada
CA - 04	3.50	N.P	0	95	5	N.P	N.P	N.P	0.42	SP	Arena mal graduada
CA - 05	3.20	N.P	73	26	1	N.P	N.P	N.P	2.77	GW	Grava bien graduada
CA - 06	3.50	N.P	8	67	25	26	18	8	4.50	SM	Arena limosa
CA - 07	3.00	N.P	59	39	2	N.P	N.P	N.P	3.11	GP	Grava mal graduada
CA - 08	3.10	N.P	15	82	3	N.P	N.P	N.P	3.20	SW	Arena bien graduada
CA - 09	3.50	N.P	0	95	5	N.P	N.P	N.P	0.39	SP	Arena mal graduada

- **Suelos tipo SW:** Están conformados por arenas bien graduadas. Su contenido de humedad es de 3.20%, constituyen suelos con grado de compactación alto y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 8 % del área de estudio y se han sido identificados en la calicata CA-08, sector San Marcos de La Aguada (II Etapa).

- **Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas. Su contenido de humedad es menor a 1.00%, constituyen suelos con grado de compactación bajo a alto y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 44 % del área de estudio y han sido identificados en las calicatas CA-03, CA-04, CA-06 y CA-09, sectores San Marcos de La Aguada (I etapa) y el A.A.H.H Dignidad Nacional.

- **Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas. Su contenido de humedad es menor a 1.00%, constituyen suelos con grado de compactación bajo a medio y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 21 % del área de estudio y han sido identificados en el posteo POST-09, extremo sur de Mala, sector Lumbreras.

- **Suelos tipo OL:** Están conformados por limos orgánicos. Su contenido de humedad es menor a 1.00%, constituyen suelos con grado de compactación bajo y presentan plasticidad baja. Estos suelos representan menos del 1 % del área de estudio y han sido identificados en el posteo POST-04 y DPL-05, inmediaciones del centro cívico y costado de la iglesia.

10.2.- Ensayo de corte directo (Norma ASTM D3080)

La finalidad de este ensayo es determinar la resistencia al esfuerzo corte de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones (esfuerzos verticales y horizontales) que simulen la que existe o existiría en el terreno como producto de la aplicación de una carga. Esta resistencia a la cortante en el suelo se debe a dos componentes: la cohesión (relacionado comportamiento plástico que presentan las partículas finas de una muestra) y el ángulo de fricción interna (rozamiento que existe en las partículas granulares). Para conocer esta resistencia en laboratorio se usa el equipo de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se aplica una carga

vertical de confinamiento (Pv) y luego una carga horizontal (Ph) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

El resultado del análisis de nueve (9) muestras extraídas de campo se muestran en la Tabla 6. Los resultados obtenidos muestran que los suelos en el área urbana de Mala no presentan cohesión; mientras que, los valores para los ángulos de fricción interna son menores a 35°, característico de suelos granulares como las arenas y gravas.

Tabla 6: Resultados del ensayo de corte directo

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m^2)	Densidad natural (Tn/m^3)
CA-01	34.34	0.00	1.97
CA-02	34.72	0.00	1.98
CA-03	28.80	0.10	N.P
CA-04	28.70	0.08	N.P
CA-05	36.00	0.00	N.P
CA-06	29.60	0.20	N.P
CA-07	34.30	0.00	N.P
CA-08	31.40	0.00	N.P
CA-09	29.50	0.00	N.P

10.3.- Capacidad de carga admisible

Los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo (ángulo de fricción y la cohesión), han permitido calcular con la ayuda de fórmulas empíricas la capacidad de carga última de los suelos (mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico). En base a esta última se obtiene la capacidad de carga admisible que resulta al ser multiplicado por un factor de seguridad, cuyo valor es de 1/3, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones. Para la ciudad de Mala y alrededores, la capacidad de carga fue calculado para una profundidad de cimentación de 1.20 m y ancho mínimo de cimentación de 1.00 m. Los resultados obtenidos para los nueve puntos analizados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Capacidad de carga admisible de nueve (9) muestras extraídas en la ciudad de Mala

MUESTRA	Capacidad de carga ultima (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
CA-01	116.63	2.92
CA-02	124.94	3.12
CA-03	49.95	1.66
CA-04	49.93	1.62
CA-05	150.00	3.80
CA-06	64.70	2.16
CA-07	115.00	2.82
CA-08	71.19	2.37
CA-09	49.96	1.65

Considerando la clasificación de la Tabla 8, se ha determinado que gran parte del área urbana de la ciudad de Mala se asienta sobre suelos con la siguiente capacidad de carga admisible (Figura 36):

Tabla 8: Rangos de capacidad de carga admisible

CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE Kg/cm ²	DENOMINACIÓN
<1.0	Muy Baja
1.0 – 2.0	Baja
2.0 – 3.0	Media
>3.0	Alta

- Capacidad de carga admisible baja: Corresponde a suelos limosos arcillosos (OL), cuyo grado de compactación es bajo. Abarca menos del 1% del área de estudio. Están presentes en las inmediaciones del centro cívico, costado de la iglesia principal de la ciudad de Mala.

- Capacidad de carga admisible media: Corresponde a suelos de grava mal graduada (GP), arena bien graduada (SW) y arena limosa (SM) con grado de compactación de bajo a medio. Abarca el 86% del área de estudio, área urbana de Mala, A.A.H.H Dignidad Nacional y San Marcos de la Aguada.

- Capacidad de carga admisible alta: Corresponde a suelos compuestos por grava bien graduada (GW) y grava mal graduada (GP) con grado de compactación

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 objetivo principal 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 Mala y alrededores.

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 Mala y alrededores 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 37 se muestra la distribución espacial de los 298 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 38 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto MA-119. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 20 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes a 1.4 y 4.0 Hz con amplificaciones relativas de hasta 2.5 y 5.2 veces con respecto al nivel de referencia. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

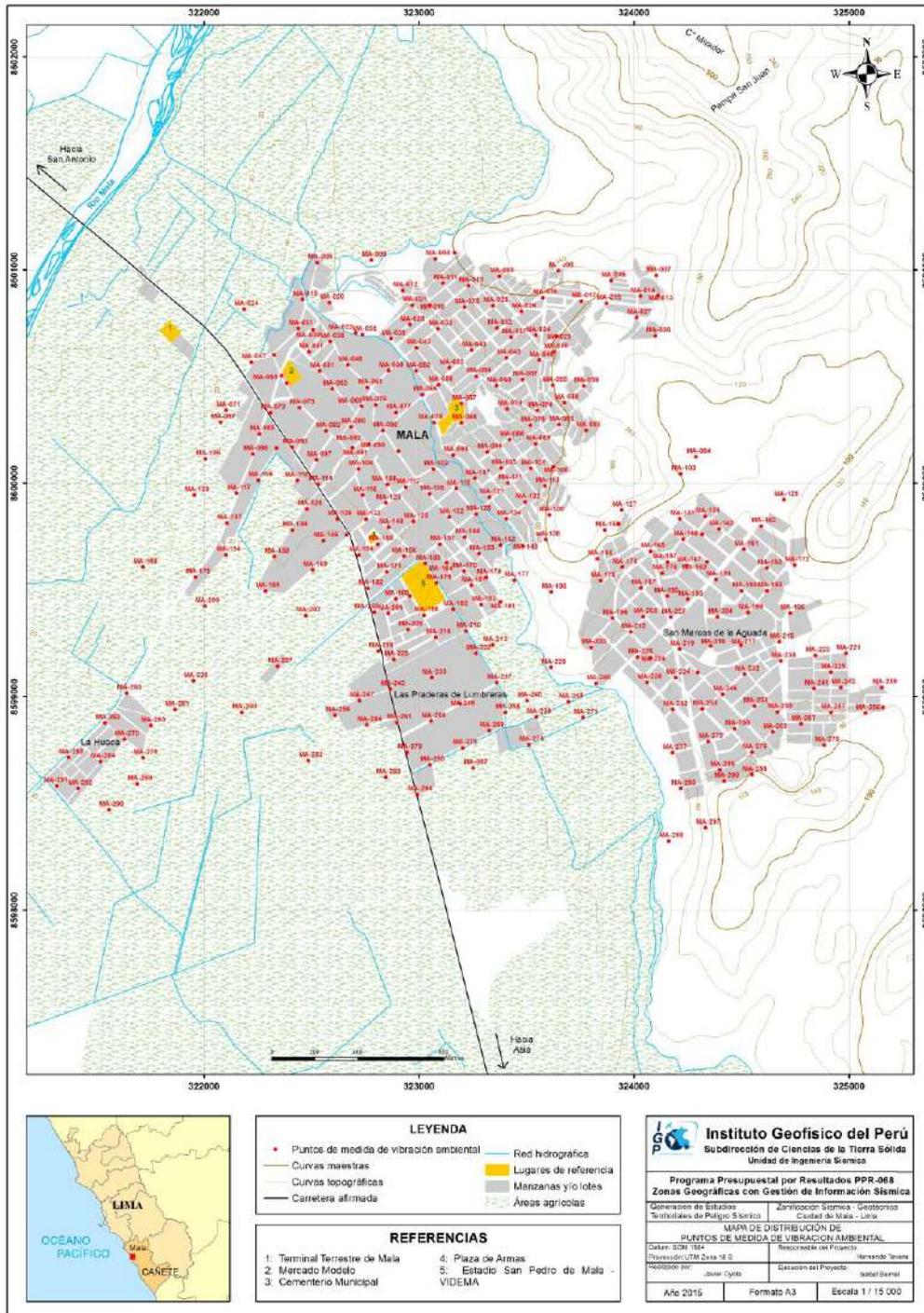


Figura 37: Mapa de la ciudad de Mala y alrededores: distribución de puntos de registro de vibración ambiental

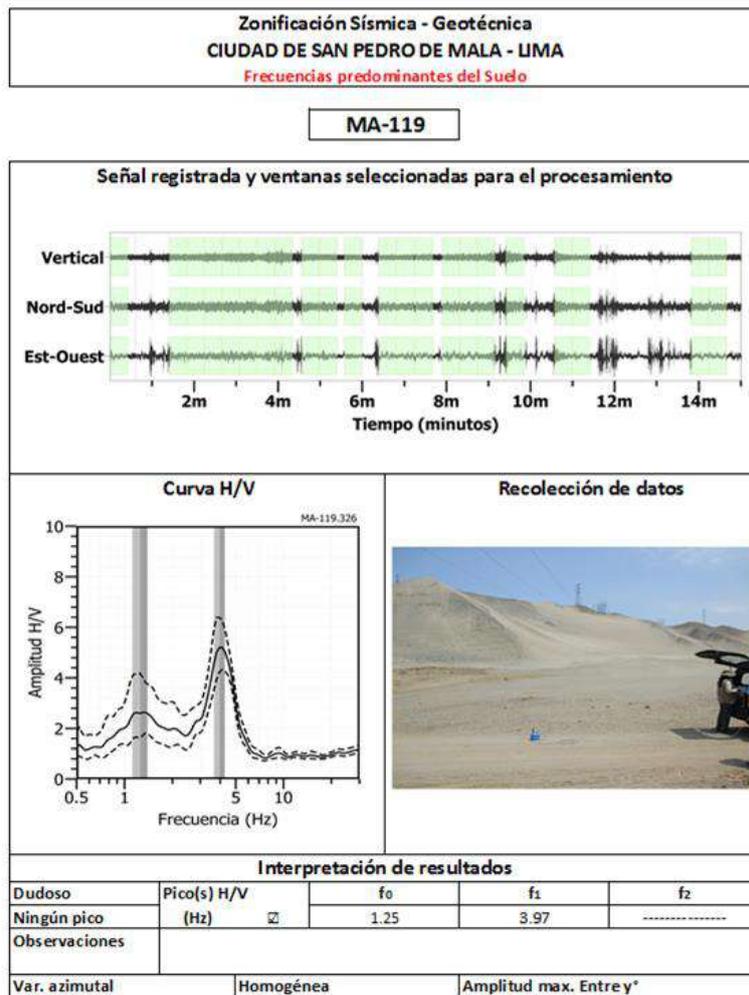


Figura 38: Ejemplo de la ficha H/V para el punto MA-119 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Abajo: resultados.

- 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 valores similares para frecuencias predominantes que se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere de un 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 para las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis dos rangos de frecuencia: Fo ($F < 2.0\text{Hz}$) y F1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$), en razón que en varios puntos de medición sobresalen hasta dos picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Mala.

***.- Frecuencias predominantes Fo ($F < 2.0\text{Hz}$):** Estas frecuencias se presentan en el 30% de los puntos en donde se recolectó información, distribuyéndose todos ellos de manera dispersa en toda el área de estudio (Figura 39).*

En la Figura 40, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos MA-038, MA-119 y MA-289, tomados de manera aleatoria. En ellos se observa que sobresalen frecuencias a 1.5, 1.3 y 1.9 Hz con amplificaciones relativas de hasta 2.5 veces en los dos primeros caso y de hasta 6 veces en el tercer caso, sobre todo en el punto ubicado en el Urb. La Huaca. Además de este primer pico de frecuencia, se identifica un segundo pico a 6.2, 4.0 y 6.8 Hz, con amplificaciones de hasta 2.0, 5.0 y 5.3 veces. La presencia de ambos picos de frecuencias evidencia la complejidad de los suelos en esta ciudad.

***.- Frecuencias predominantes F1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$):** Este rango de frecuencias se presenta en el 80% de los puntos en los cuales se recolectó información. Obsérvese que las mayores amplificaciones se presentan en los extremos Norte y SE del área de estudio (Figura 41).*

En la Figura 42, se muestran ejemplos de razones espectrales para los puntos MA-65 (C), MA-86 (E) y MA-150 (I), ubicados en la zona céntrica de la ciudad, entre la Plaza de Armas y el Mercado modelo de la ciudad. Para los dos primeros puntos no sobresale ningún rango de frecuencia con amplificaciones mayores e iguales a 2 veces, pero si a menores amplitudes y (9.0 y 4.0 Hz). Por otro lado, conforme se tiende hacia el extremo sur del área, cerca de la Plaza de Armas (MA-150), sobresalen frecuencias a 2.1 y 6.0 Hz con amplificaciones de hasta 2.2 veces. Estos resultados evidencian la presencia de suelos superficiales con mayor consistencia hacia el extremo norte de la

ciudad. Hacia el sur, las frecuencias sugieren la presencia de suelos complejos al considerar la presencia de dos picos de frecuencia.

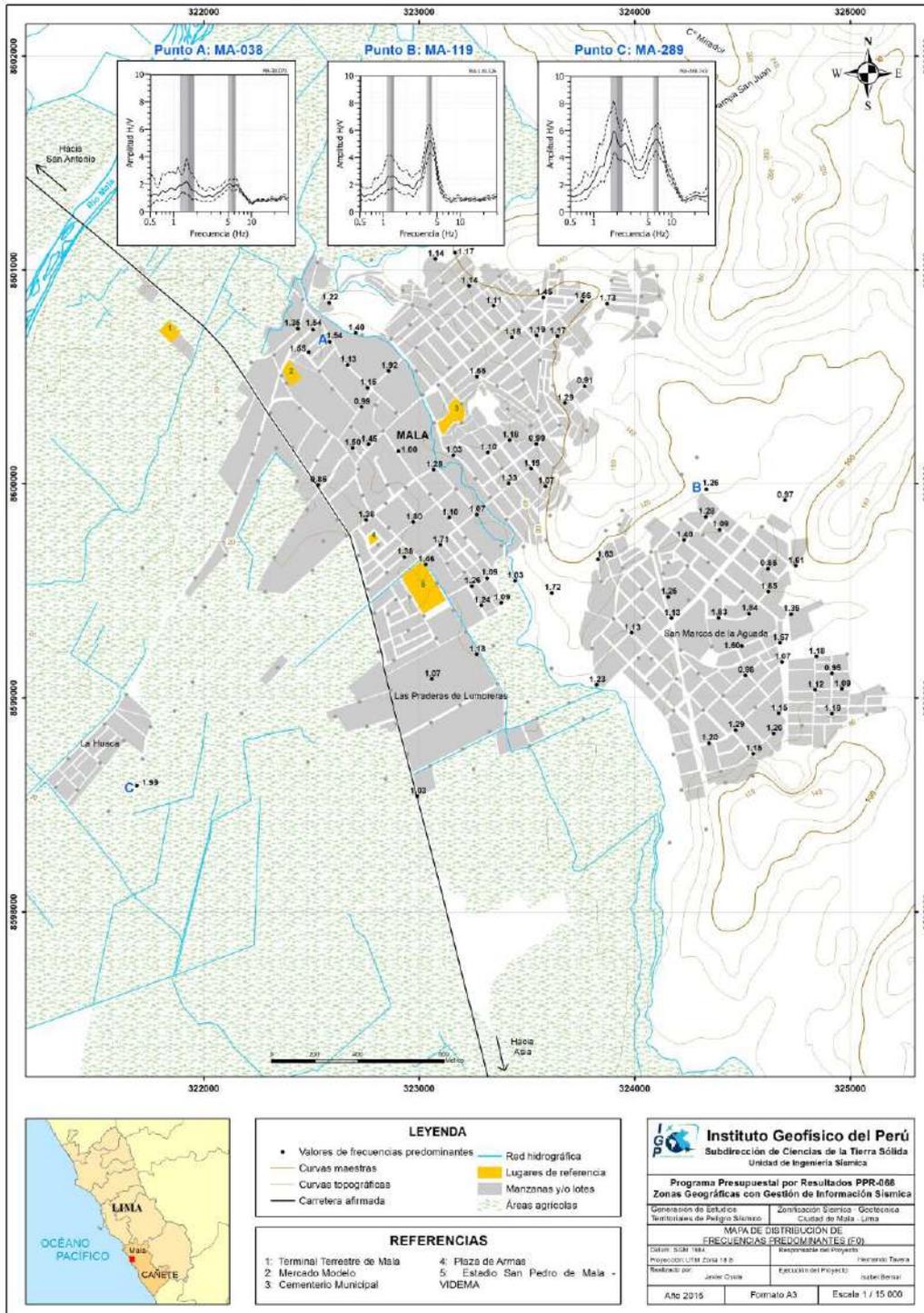
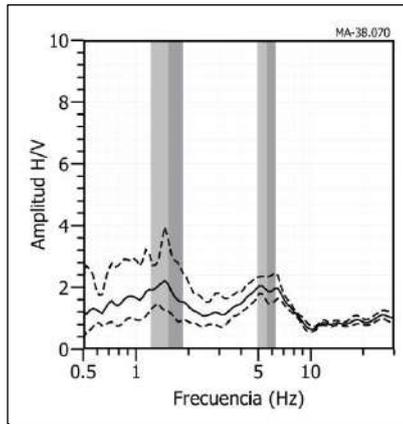
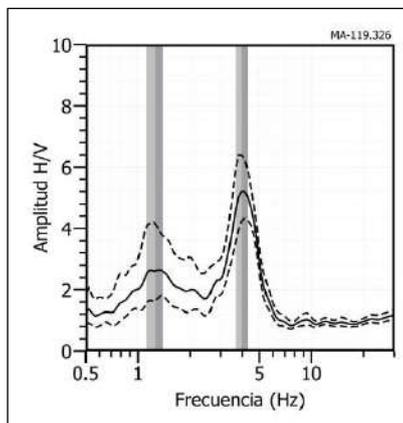


Figura 39: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes: F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$).

MA - 38



MA- 119



MA- 289

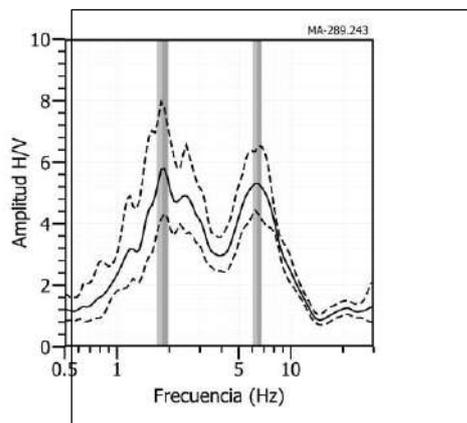


Figura 40. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0\text{Hz}$). Los puntos MA-38, MA-119 y MA-289, se encuentran en el extremo NE del área céntrica de la ciudad, el segundo en la Urb. San Marcos de la Aguada y el tercero en la Urb. Huaca. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

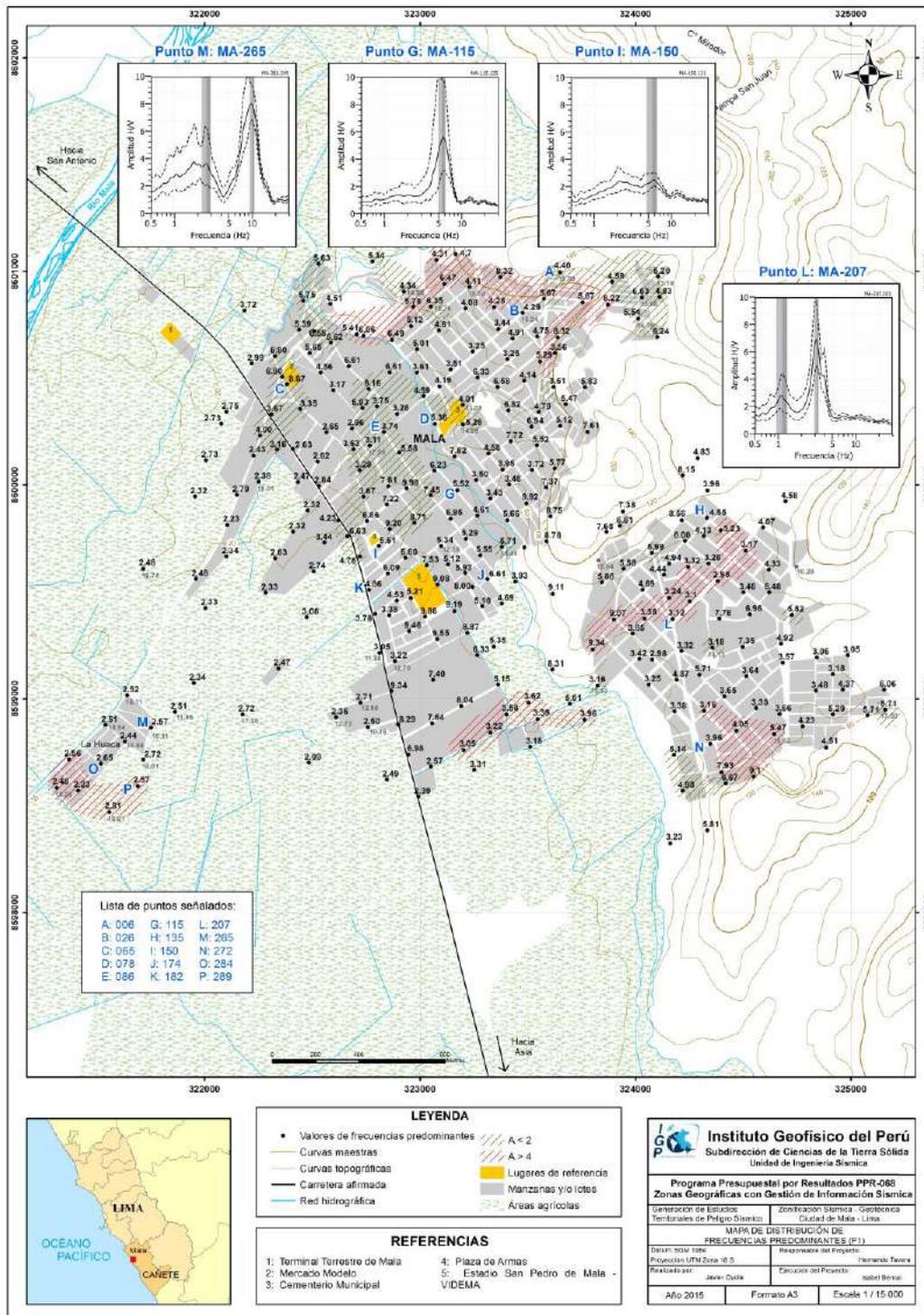
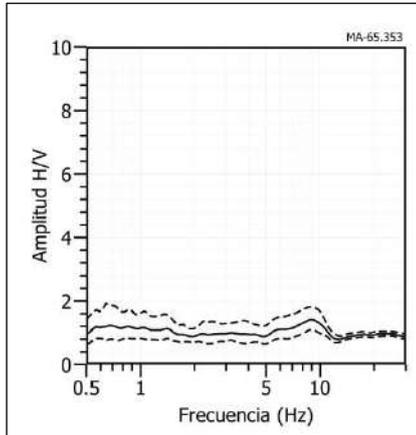
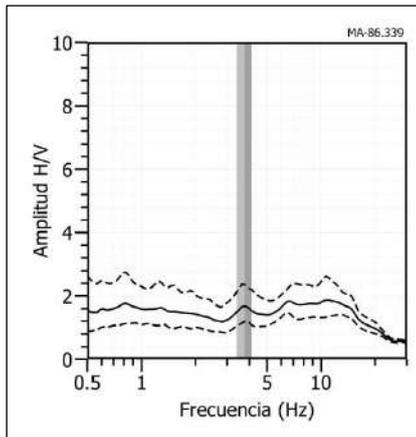


Figura 41: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes: F1 (F₁ ≥ 2.0Hz).

MA - 65



MA - 86



MA- 150

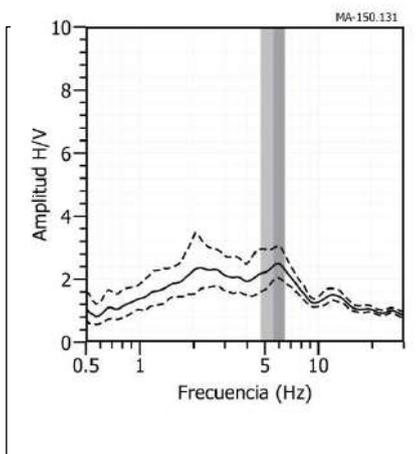


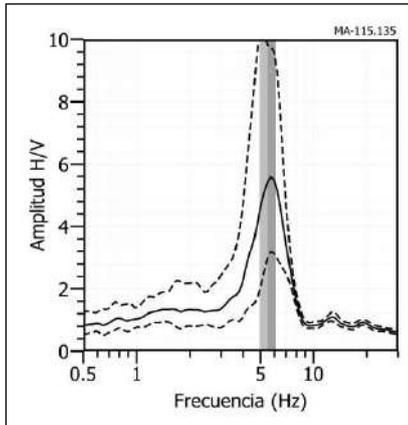
Figura 42: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz). El punto MA-65 (C) se ubica en el mercado modelo de Mala, MA-86 (E) y MA-150 (I) en la zona central de Mala. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

Los puntos MA-115 (G), MA-174 (J) y MA-182 (K), ubicados en el extremo Sur de la zona céntrica de la ciudad. Para el primer punto ubicado en el NE de la plaza de Armas, sobresale claramente un pico bien definido a 6.0 Hz; para el segundo ubicado al Este del Estadio San Pedro de Mala (VIDEMA), sobresale un pico a 7.0 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces. Para el tercer punto ubicado hacia el extremo SO de la Plaza de Armas, por la forma de la curva evidencia una migración a valores mayores de frecuencias y amplificaciones de 2.2 veces para la frecuencia de 5.0 Hz. Estos resultados evidencian que los suelos que se encuentran hacia el extremo Este, presentan mayor amplificación y se asocian a capas de menor espesor respecto a lo observado hacia el extremo SO.

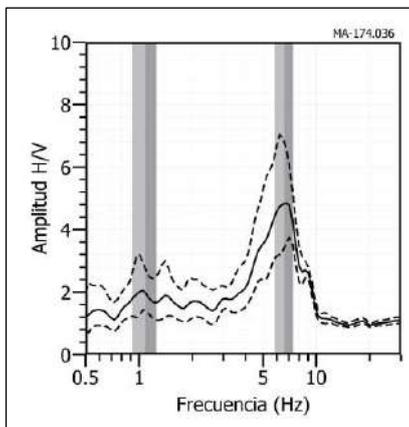
Por otro lado, hacia el extremo NE del área de estudio se encuentran los puntos MA-06 (A), MA-26 (B) y MA-78 (D), ordenados de manera decreciente según su cota. En el punto ubicado en la cota de 140m.s.n.m., sobresale frecuencias alrededor de los 12 Hz con amplificaciones de hasta 5.2 veces y en el punto ubicado a los 90 m.s.n.m., sobresalen frecuencias entre 10 y 20 Hz con amplificaciones de hasta 6 veces, lo cual evidencia la baja consistencia de estos estratos. Contrariamente, en el punto MA-78 ubicado en la cota de los 40 m.s.n.m. (próximo al Cementerio Municipal), sobresale un pico bien definido a 5.4 Hz con amplificaciones de hasta 4.2 veces. Estos resultados evidencian una clara correlación con la topografía; es decir, en zonas planas los valores de frecuencia tienden a ser bajos y hacia cotas mayores, estos tienden a valores altos de frecuencias.

Las curvas de las razones espectrales obtenidas para los puntos MA-135 (H), MA-207 (L) y MA-272 (N) ubicados en la Urb. San Marcos de la Aguada, evidencian que estos suelos responden en dos rangos de frecuencia, el primero se presenta alrededor de 1.2 Hz y el segundo fluctúa entre 3.2 y 4.8 Hz, con un factor de amplificación de hasta 3.5 veces y en el punto MA-207 de hasta 7 veces. Estos resultados evidencian que estos suelos presentan de moderada a baja consistencia.

MA- 115



MA- 174



MA- 182

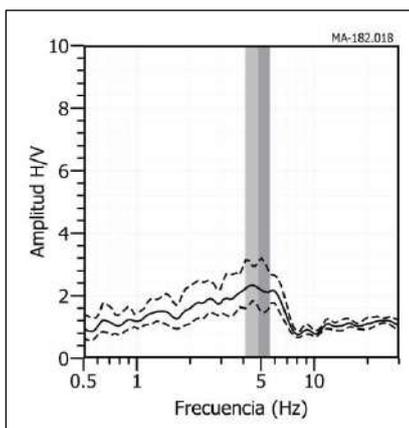
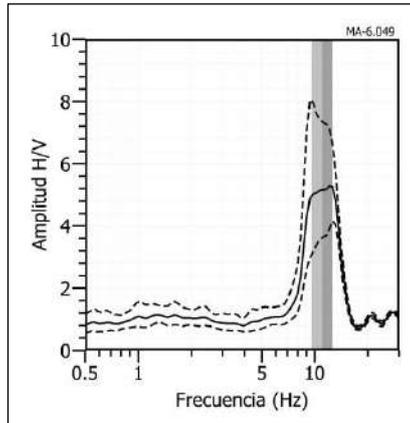
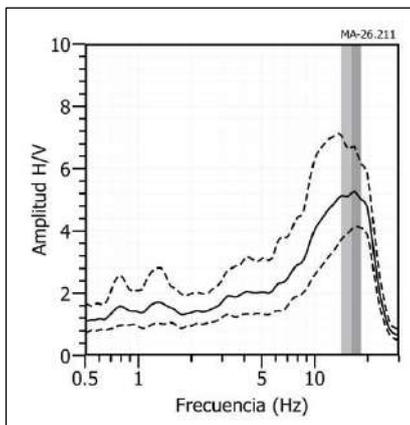


Figura 42: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz). Para los puntos MA-115 (G), MA-174 (J) y MA-182 (K), ubicados en los alrededores del estadio de San Pedro de Mala. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

MA - 06



MA - 26



MA - 78

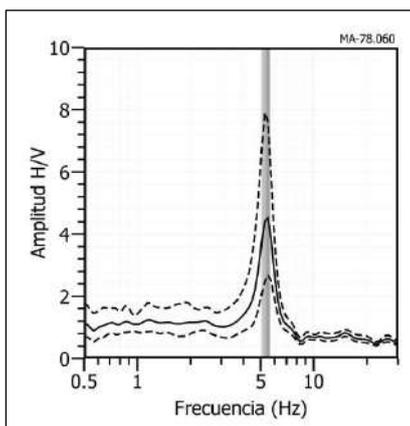
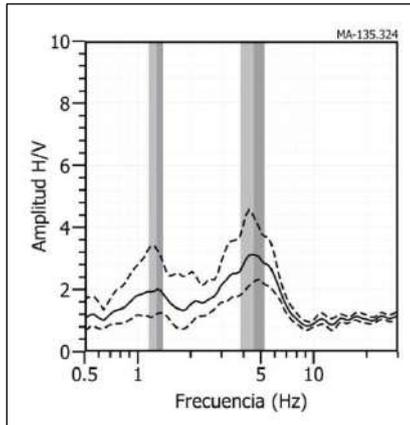
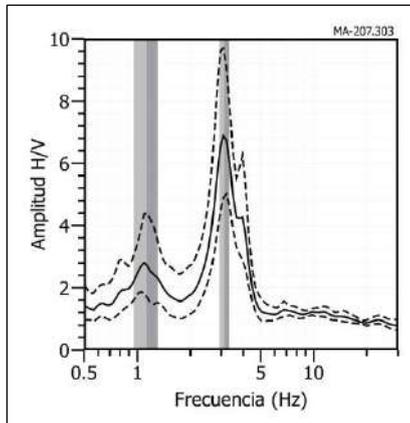


Figura 42: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$). Para los puntos MA-06 (A), MA-26 (B) y MA-78 (D), ubicados hacia el extremo Norte de la zona céntrica, estando el último próximo al cementerio municipal. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

MA- 135



MA- 207



MA - 272

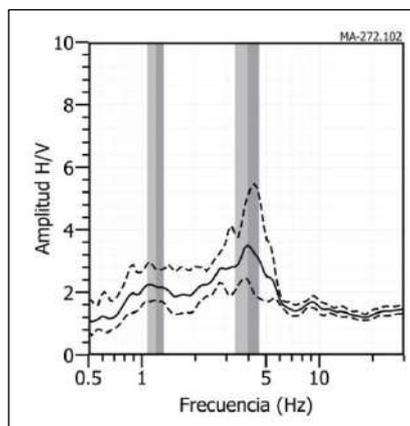


Figura 42: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0$ Hz). Para los puntos MA-135 (H), MA-207 (L) y MA-272 (N), ubicados en la Urbanización San Marcos de la Aguada. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

En las razones espectrales obtenidas para puntos MA-265 (M), MA-284 (O) y MA-289 (P) ubicados la urbanización La Huaca, sobresalen dos picos de frecuencia, el primero entre 1.7 y 1.9 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces y el segundo entre 9.7, 9.9 y 6.3 Hz respectivamente, con amplificaciones máximas de al menos 9, 4 y 5.6 veces. El alto factor de amplificación que experimenta esta zona para estos rangos de frecuencia, se asocia a la baja consistencia de los suelos que conforman su capa superficial.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Mala, sugieren la presencia de suelos dinámicamente estables, principalmente hacia el extremo norte de la zona céntrica de la ciudad, a diferencia de lo observado hacia su extremo sur, especialmente en las urbanizaciones La Huaca y San Marcos de la Aguada, donde los suelos evidencian una mayor complejidad (presencia de dos picos de frecuencia, con amplificaciones de hasta 6 veces). En dirección NE con respecto al centro de la ciudad, los suelos son más estables y presentan un incremento en su espesor de manera progresiva, desde las laderas del cerro hacia las zonas más bajas.

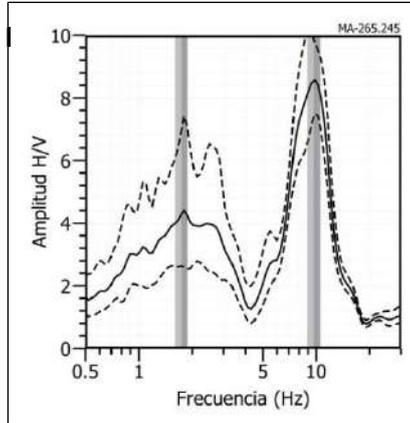
11.2.- Estudios sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos

La técnica MASW (Multichannel Análisis 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.

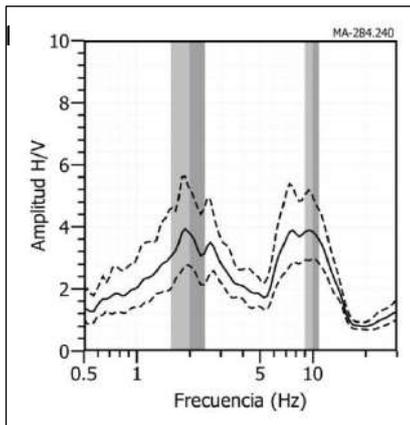
Para el registro de la información se ha utilizado un equipo de refracción sísmica que consta de un registrador multipropósito, modelo GEODE (24-canales), geófonos de 4.5 Hz y registros a una resolución de 24 bits con un rango dinámico mayor a 110 dB. Como fuente de impacto y/o energía para generar las 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.

MA - 265



MA - 284



MA - 289

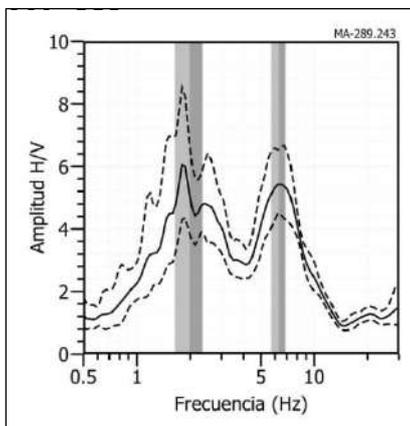


Figura 19: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F \geq 2.0\text{Hz}$). Para los puntos MA-265 (M), MA-284 (O) y MA-289 (P), ubicados en el sector de la Huaca. En los gráficos, la línea continua representa el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

En la Tabla 9 se presenta las coordenadas de cada línea sísmica y en la Figura 43, el mapa de la ciudad de Mala con la distribución espacial de las 8 líneas codificadas como: LS01-MA..., LS08-MA.

Tabla 9. Coordenadas y características de las líneas sísmicas

Línea Sísmica	Este (m)	Sur (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total de registro (m)
LS01-MA	321483	8598707	30	3	69
	321433	8598661	28		
LS02-MA	323137	8599423	43	4	92
	323056	8599376	42		
LS03-MA	322541	8600658	60	3	69
	322496	8600609	59		
LS04-MA	323654	8600280	107	3	69
	323612	8600336	104		
LS05-MA	324375	8599691	78	3	69
	324304	8599685	75		
LS06-MA	324462	8598815	73	3	69
	324405	8598772	72		
LS07-MA	323068	8598825	36	3	69
	323119	8598874	37		
LS08-MA	322588	8600018	48	3	69
	322624	8600076	47		

Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas 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):

-Suelos blandos ($V_s \leq 180$ m/s)

-Suelos duros ($V_s=180$ m/s - 500m/s):

.....Moderadamente duros (180m/s – 350m/s)

.....Duros (350m/s -500m/s)

-Suelos muy duros o roca blanda ($V_s=500$ m/s-1500m/s)

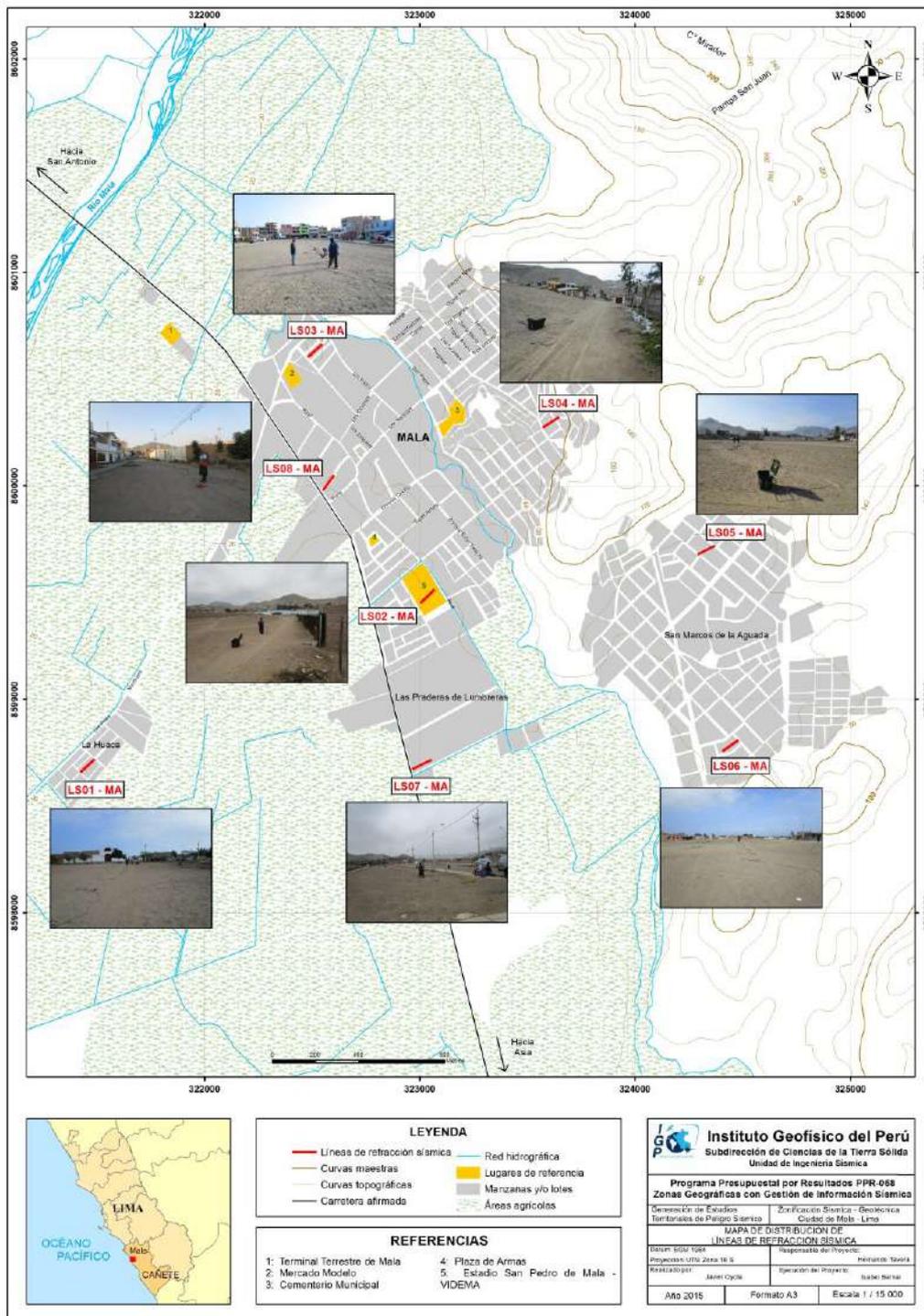


Figura 43: Mapa de la ciudad de Mala y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-MA, ..., LS08-MA.

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 Mala.

- Línea sísmica LS01-MA: Línea sísmica realizada en el AH La Huaca, ubicado en el extremo sur-oeste de la ciudad de Mala. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 28 metros, indicando la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera de 4 metros de espesor y velocidad de 141 m/s, que corresponde a suelos blandos. La segunda de 12 metros de espesor y velocidades Vs de 417 m/s, que corresponde a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 709 m/s y corresponde a suelos muy duros o roca blanda (Figura 44a).

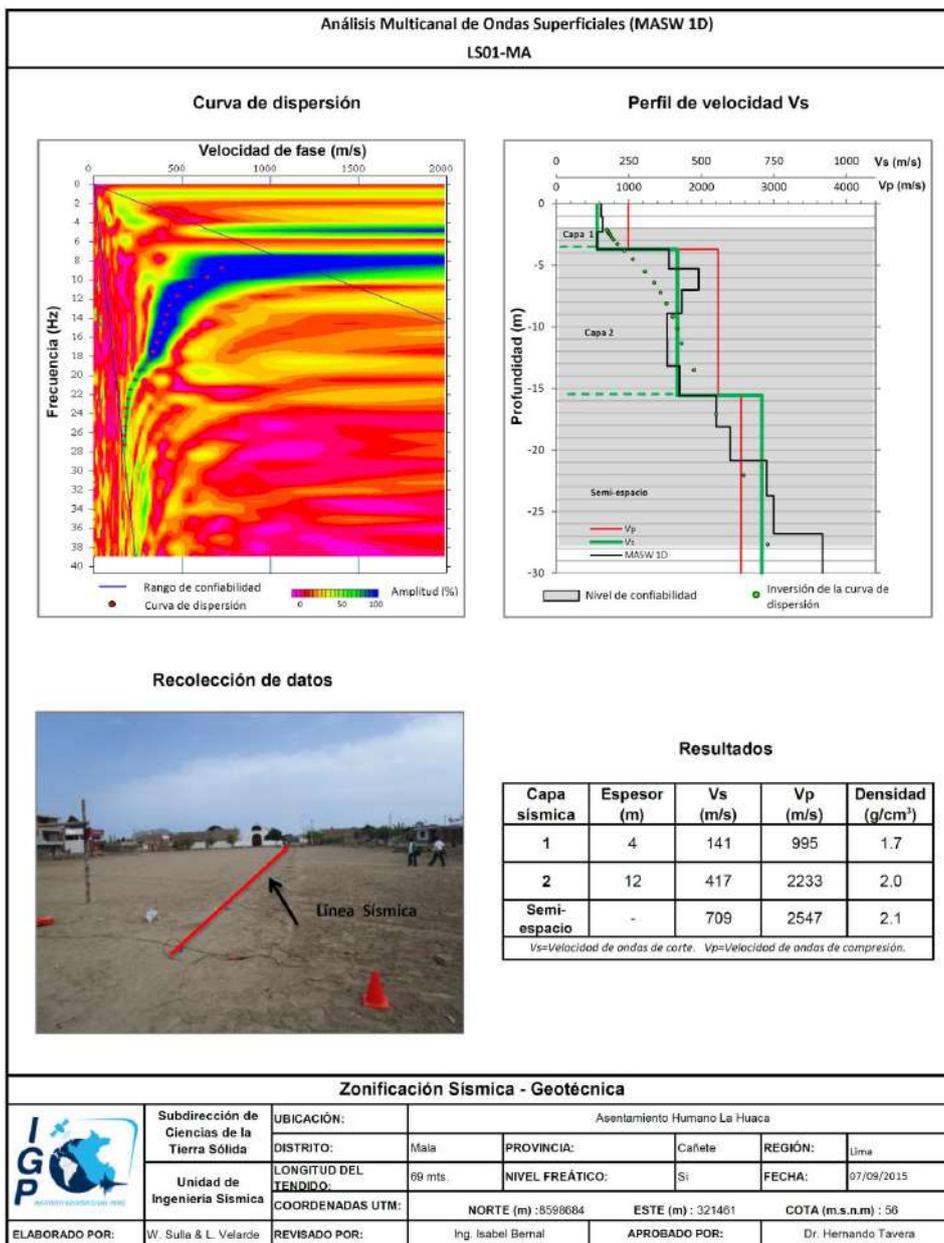


Figura 44. a) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS01- MA.

- Línea sísmica LS02-MA: Realizada a espaldas de la VIDENA de Mala, extremo sur de la ciudad. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, indicando la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 223 m/s, que corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 10 metros de espesor y velocidades Vs de 542 m/s que corresponde a suelos muy duros o roca blanda. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs de 900 m/s, que sugiere rocas moderadamente duras (Figura 44b).

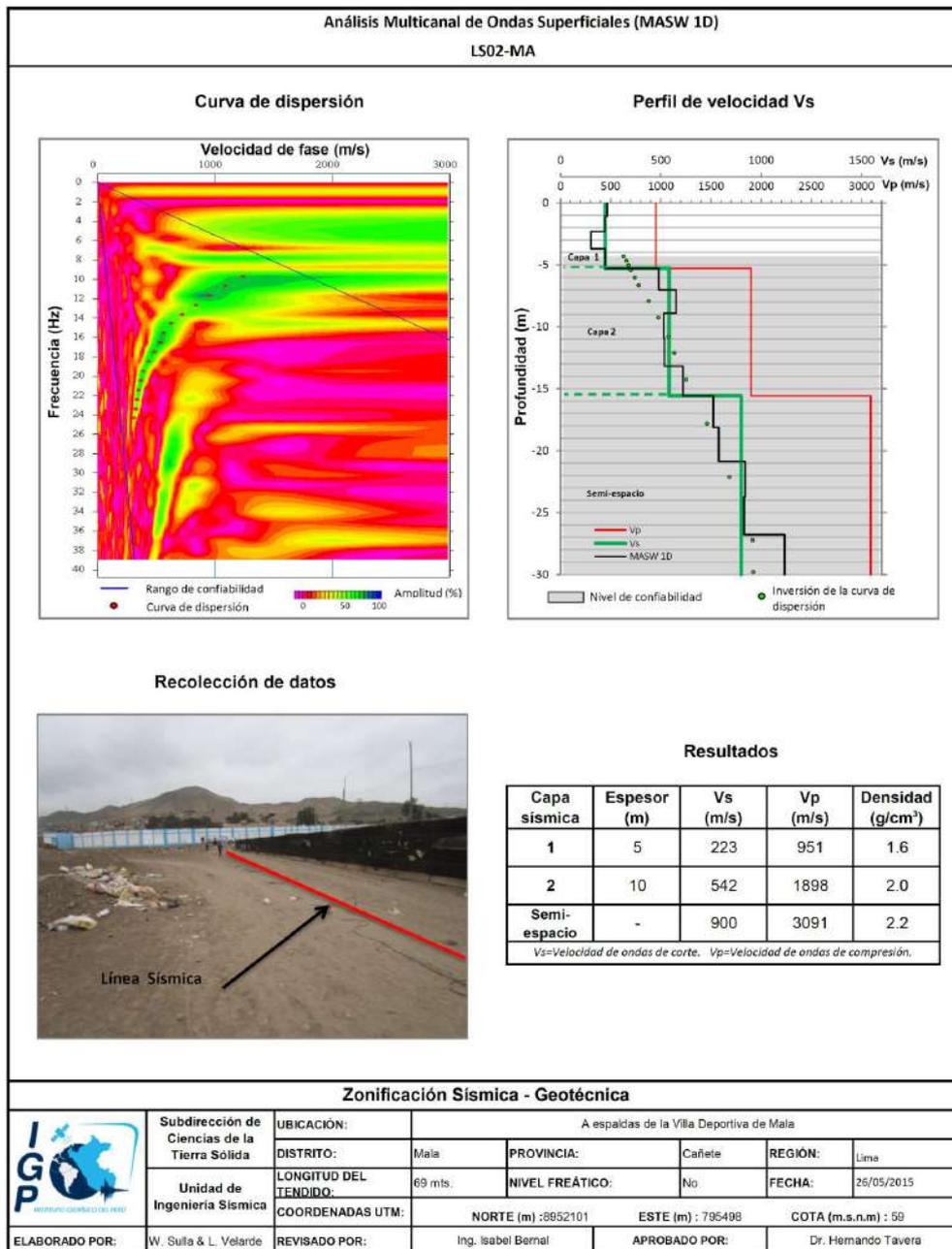


Figura 44. b) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS02- MA.

.- Línea sísmica LS03-MA: Realizada en el Mercado San Pedro de Mala, extremo norte de la ciudad. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta 30 m de profundidad, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera de 5 metros de espesor y velocidades Vs de 344 m/s, que corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 13 metros de espesor y velocidades Vs de 638 m/s, que indica suelos muy duros a roca blanda. La superficie de contacto con el semiespacio presenta Vs de 975 m/s; es decir, rocas moderadamente duras (Figura 44c).

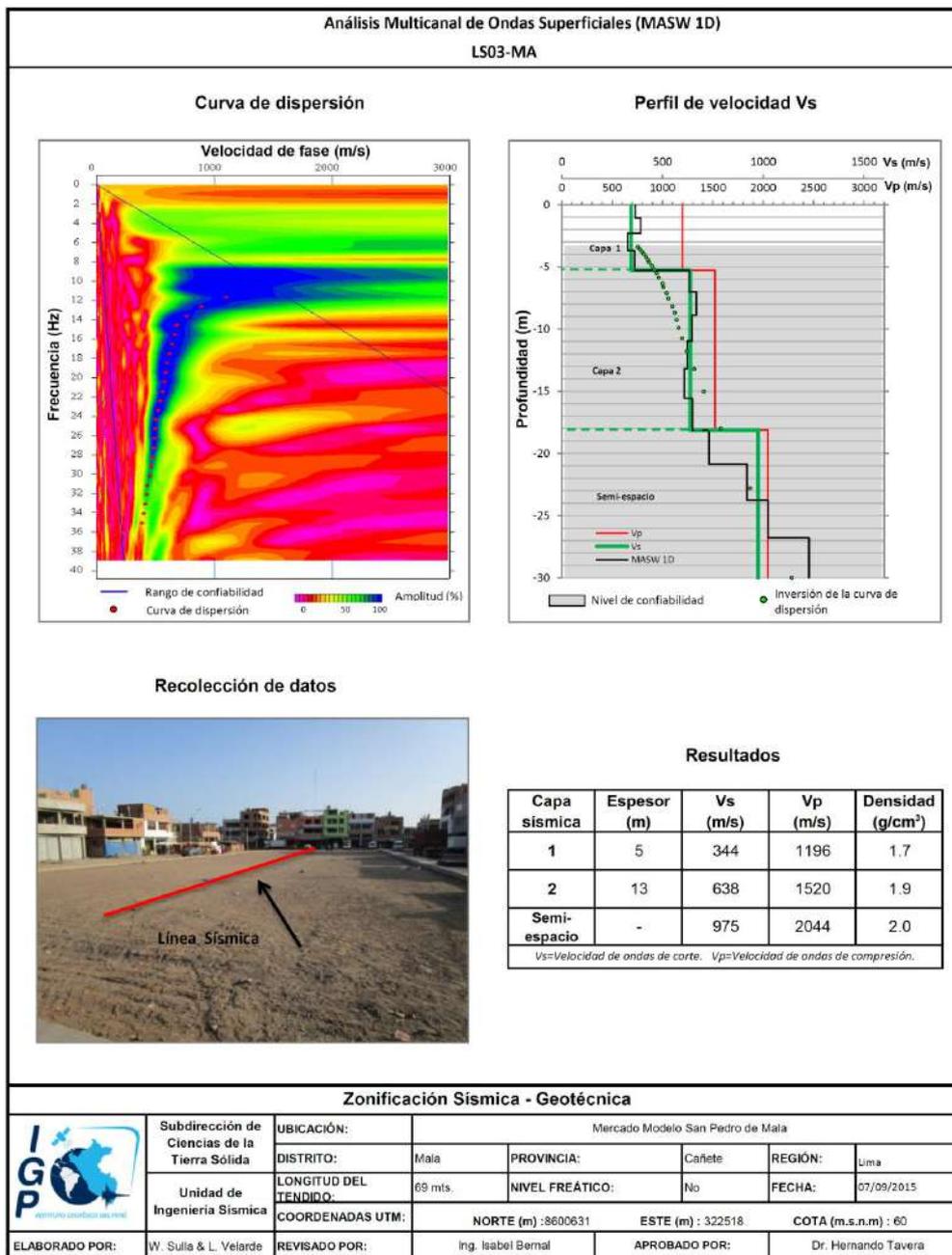


Figura 44. c) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS03- MA.

- Línea sísmica LS04-MA: Realizada en el AH Cerro La Libertad ubicado en la parte alta de Mala. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 22 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 5 metros y Vs de 276 m/s asentada sobre una segunda capa de 8 metros de espesor y Vs de 342 m/s. Ambas capas corresponden a suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta una Vs de 526 m/s, que sugiere suelos duros o rocas blandas (Figura 44d).

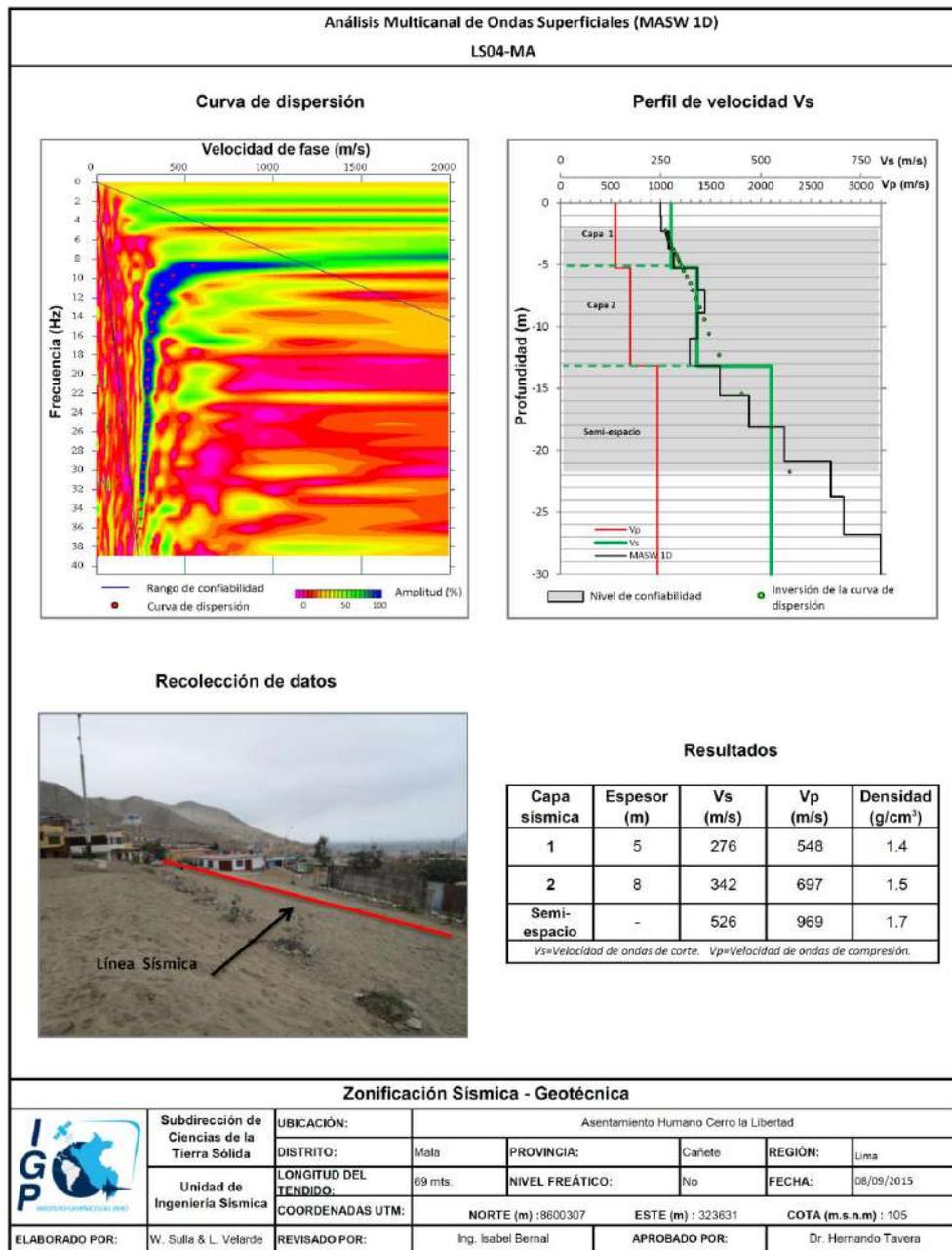


Figura 44. d) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS04- MA.

.- Línea sísmica LS05-MA: Realizada en el AH San Marcos de la Aguada, extremo este de la ciudad de Mala. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta un profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por una capa de 18 metros de espesor y velocidades Vs de 445 m/s que correspondería a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades Vs de 658 m/s lo cual sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 44e).

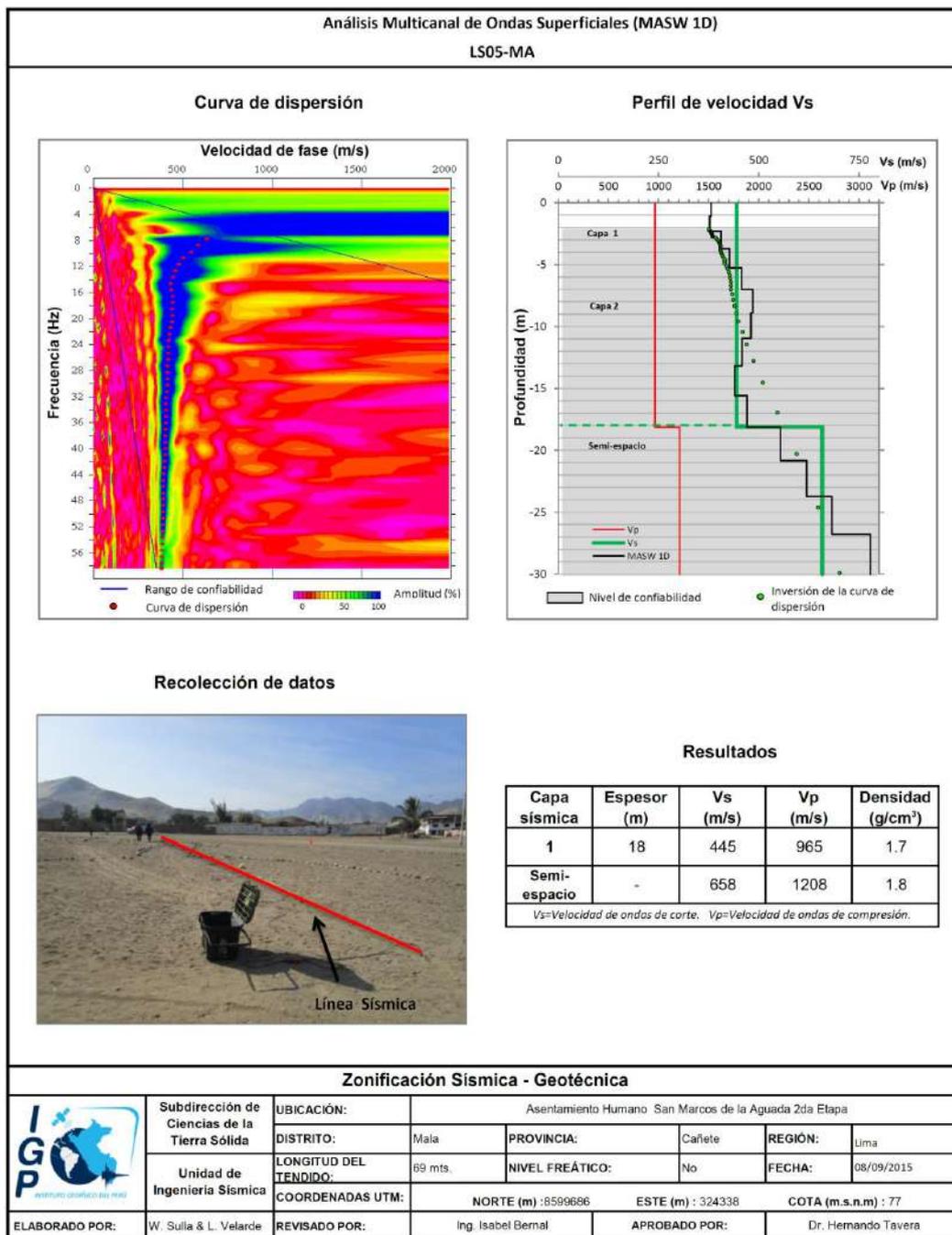


Figura 44. e) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS05- MA.

- Línea sísmica LS06-MA: Realizada en el AH San Marcos de la Aguada. El perfil de Vs es confiable hasta un profundidad de 28 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con 7 metros de espesor y Vs de 378 m/s que sugiere suelos duros. La segunda de 11 metros de espesor y Vs de 522 m/s que corresponde a suelos muy duros o roca blanda. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 641 m/s que sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 44f).

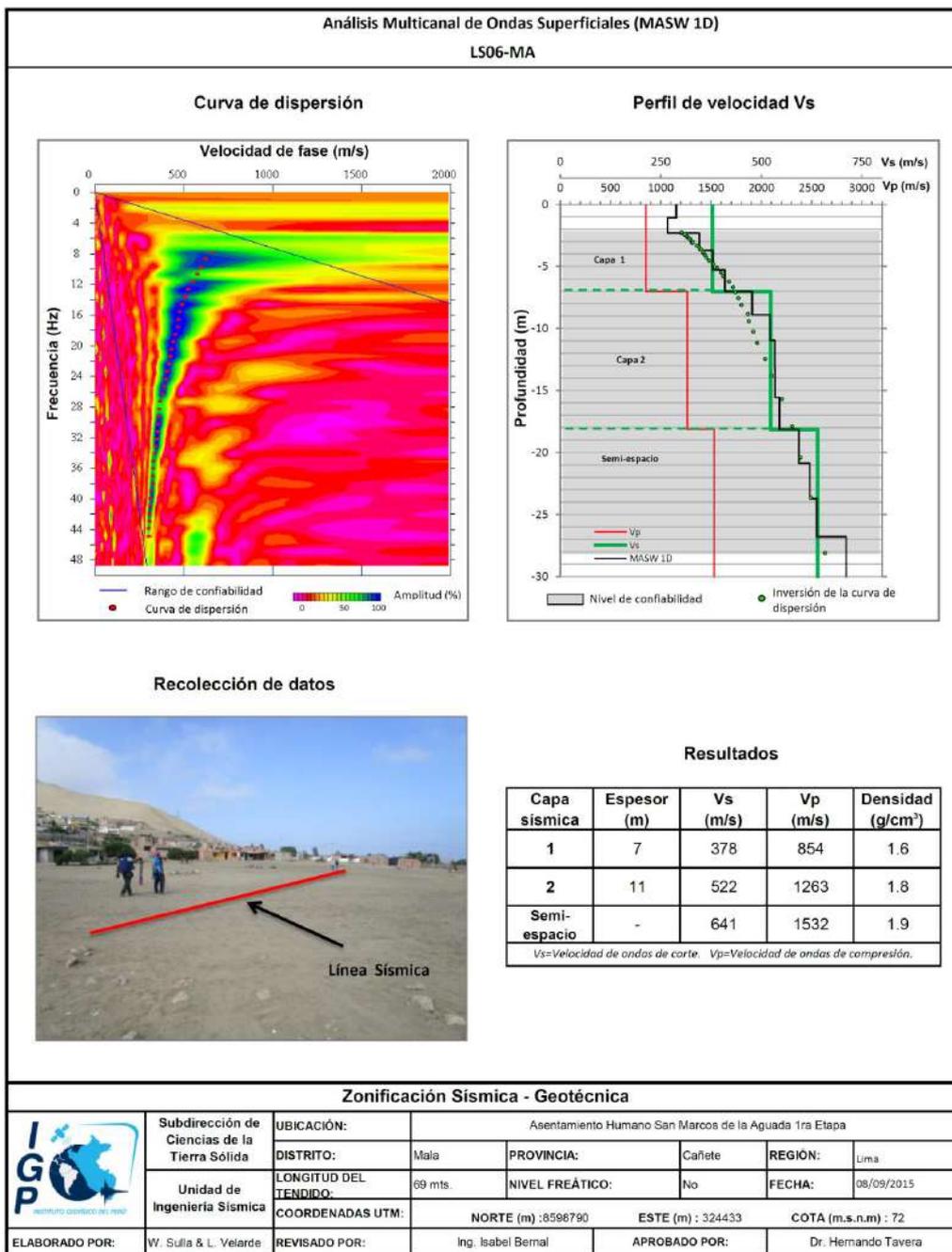


Figura 44. f) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS06- MA.

- Línea sísmica LS07-MA: Realizada en la Urb. La Pradera de Lumbreras, extremo sur de la ciudad. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 24 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y Vs de 188 m/s que corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 9 metros de espesor y Vs de 372 m/s que sugiere suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades Vs promedio de 791 m/s al cual correspondería rocas moderadamente duras (Figura 44g).

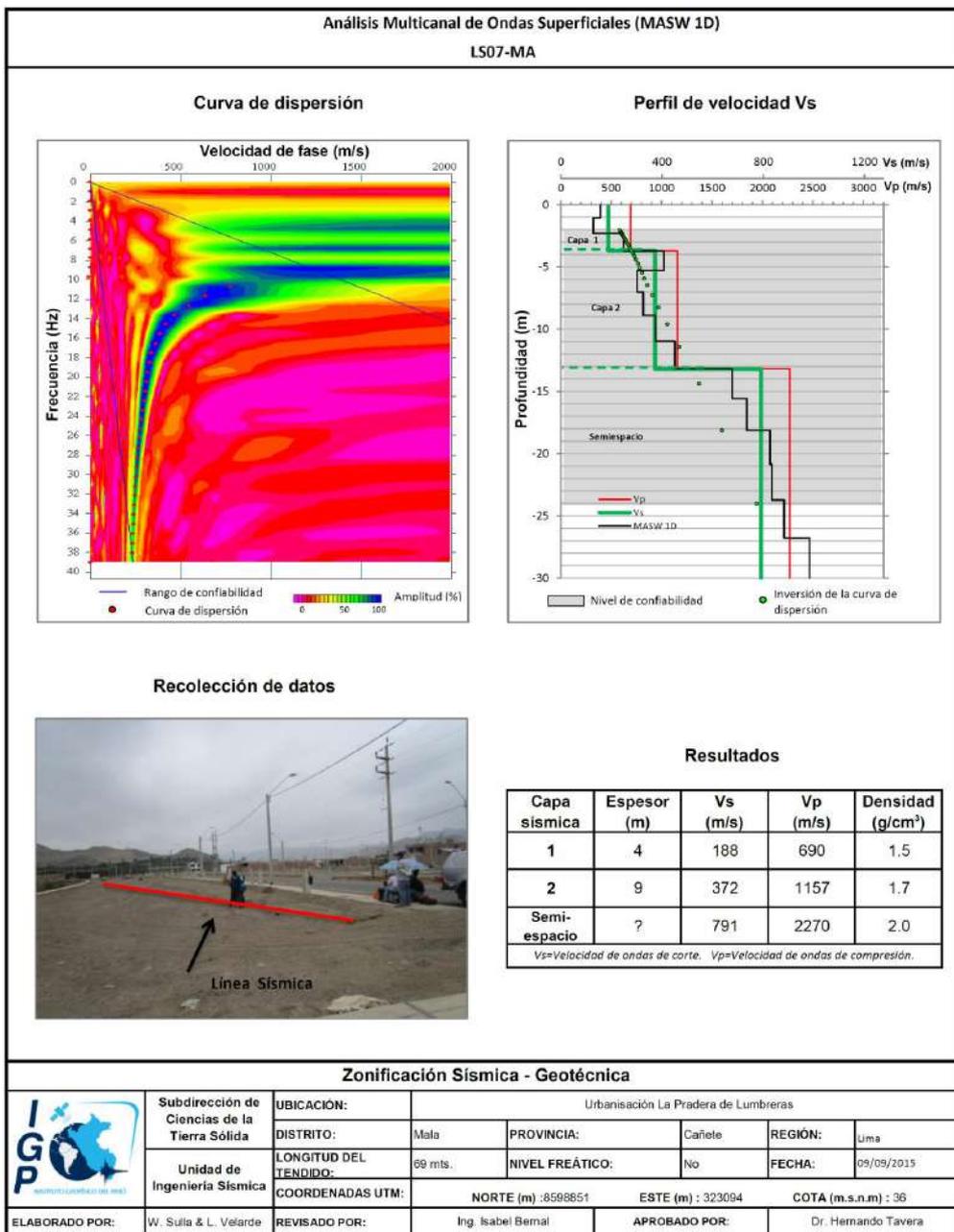


Figura 44. g) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS07- MA.

- Línea sísmica LS08-MA: Realizada frente al I.E.P José Antonio Encinas, extremo oeste de la ciudad. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta un profundidad de 23 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con espesor de 4 metros y Vs de 376 m/s, que sugiere suelos duros. La segunda de 9 metros y Vs de 611 m/s que sugieren suelos muy duros o roca blanda. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 814 m/s la cual correspondería a rocas moderadamente duras (Figura 44h).

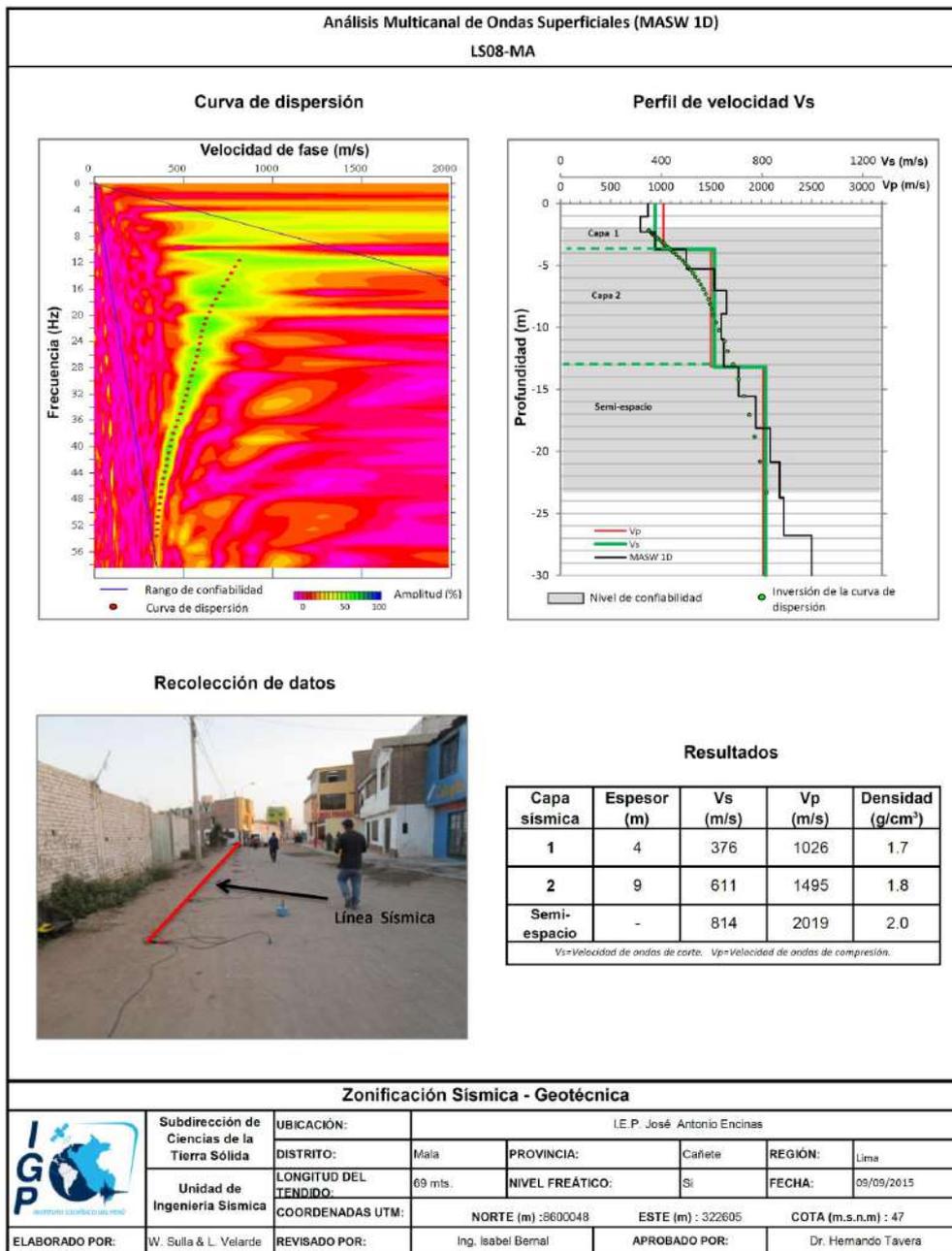


Figura 44. h) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS08- MA.

En la Tabla 10, se muestra el resumen del número de capas, espesores y velocidades Vs para cada línea sísmica realizada en la ciudad de Mala.

Tabla 10. Valores de espesor y velocidad Vs de las líneas sísmicas.

Línea sísmica	n° capa				
	1		2		Semiespacio
	Esp.(m)	Vs (m/s)	Esp.(m)	Vs (m/s)	Vs (m/s)
LS01-MA	4	141	12	417	709
LS02-MA	5	223	10	542	900
LS03-MA	5	344	13	638	975
LS04-MA	5	276	8	342	526
LS05-MA	18	445			658
LS06-MA	7	378	11	522	641
LS07-MA	4	188	9	372	791
LS08-MA	4	376	9	611	814
<i>Suelos blandos (Vs < 180 m/s)</i>					
<i>Suelos duros (Vs=180 m/s - 500m/s)</i>					
..... <i>moderadamente duros (180 - 350)</i>					
..... <i>duros (350 -500)</i>					
<i>Suelos muy duros o roca blanda (Vs=500m/s-800m/s)</i>					
<i>Rocas moderadamente duras (Vs=800m/s-1500m/s)</i>					

En la ciudad de Mala, la distribución de velocidades Vs ha permitido considerar para la presencia de tres sectores. El primero considera a las líneas sísmicas LS01 y LS07, el segundo a las líneas sísmica LS02, LS03, LS04 y LS08 (zona céntrica de la ciudad) y el tercero a las líneas sísmicas LS05 y LS06 (Urb. San Marcos de la Aguada), ver Figura 3. En general, los resultados, muestran la presencia de suelos conformados por dos capas bien definidas, la primera con velocidades (Vs) bajas (180 m/s) que correspondería a suelos de material de cultivo y material orgánico que sobreyacen a suelos aluviales más consistentes (velocidades de entre 300 y 500 m/s) y con espesores de hasta 15 metros, siendo estos de mayor espesor bajo la Urb. San Marcos de la Aguada. Todas estas capas están asentadas sobre un estrato de material intrusivo meteorizado.

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.

En la Figura 45 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Mala y su análisis permite observar que en dirección NE, hacia la Carretera a San Antonio, se tiene el dominio de periodos entre 0.1 y 0.2 segundos. Del mismo modo, en la zona céntrica de Mala y en la Urb. San Marcos de la Aguada, sobresalen periodos de 0.3 segundos. Contrariamente, hacia el extremo SO de la carretera a San Antonio, se observa la concentración de valores de 0.4 segundos.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Mala 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, velocidades de 300 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.2 y 0.4 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 15 a 30 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

En general, en el mapa de la Figura 45, se observa que los periodos dominantes demarcan a dos zonas con suelos dinámicamente similares. La primera considera periodos menores e iguales a 0.3 segundos, presentes en el extremo Este de la carretera principal que cruza la ciudad, en el área central de la ciudad, así como en el AH San Marcos de la Aguada. Estos periodos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por otra de mayor espesor y más profunda. La segunda zona es definida por la presencia de periodos dominantes mayores a 0.3 segundos, presentes en el extremo Oeste de la carretera principal de Mala. Estos valores sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran potencia que domina el comportamiento dinámico de la zona.

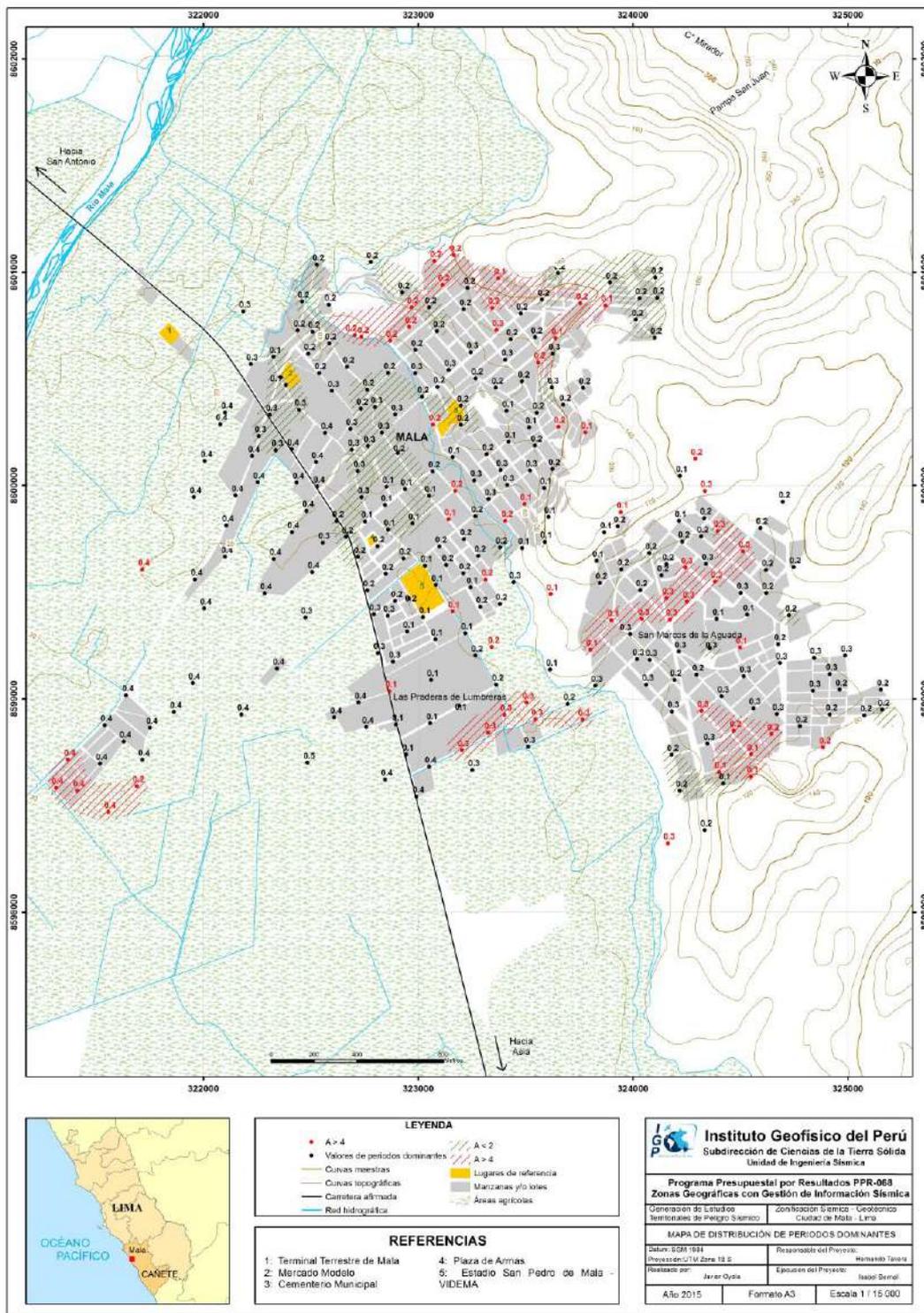


Figura 45: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Mala.

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 con mayor o menor contenido de agua. Conocidas las resistividades del suelo ($\Omega.m$), por medio de secciones transversales (2-D) se modela versus la profundidad y los resultados son validados con datos geológicos. En la ciudad de Mala y alrededores se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 25 electrodos a fin de alcanzar tendidos de 72 a 144 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 24 y 40 metros (Tabla 11). La distribución espacial de las líneas de tomografía se muestra en la Figura 46.

Tabla 11: Características de las líneas eléctricas.

Nombre de la Línea o sección geo-eléctrica	Separación de Dipolo / Número de electrodos	Extensión de la línea	Orientación de la línea
LE01-MA	3 m / 25 electrodos	72 m	NE - SW
LE02-MA	4 m / 25 electrodos	96 m	NE - SW
LE03-MA	3 m / 25 electrodos	72 m	NE - SW
LE04-MA	6 m / 25 electrodos	144 m	NE - SW

A continuación, se describe las características de cada una de las secciones geo-eléctricas obtenidas a fin de conocer el valor real de la resistividad del subsuelo, en la ciudad de Mala.

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-MA: Realizada en la Huaca-Hacienda Salitre, extremo suroeste de la ciudad de Mala. La profundidad alcanzada es de 12 metros con el predominio de valores bajos resistivos. En la línea se observa valores de resistividad menores a 100 ohm.m en la superficie y a diferentes niveles de profundidad. Valores de resistividad entre 100 a 500 ohm.m se distribuyen formando tres ovoides de diferente espesor a 1 metro de profundidad aproximadamente. Estos mismos valores están presentes a la misma profundidad entre las estaciones 12 a 18 y entre 24 a 41. Los valores de resistividad bajos pueden asociarse a la presencia de humedad y afloramientos

de salitre en la zona (Figura 47a). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arenas y limos con presencia de humedad.

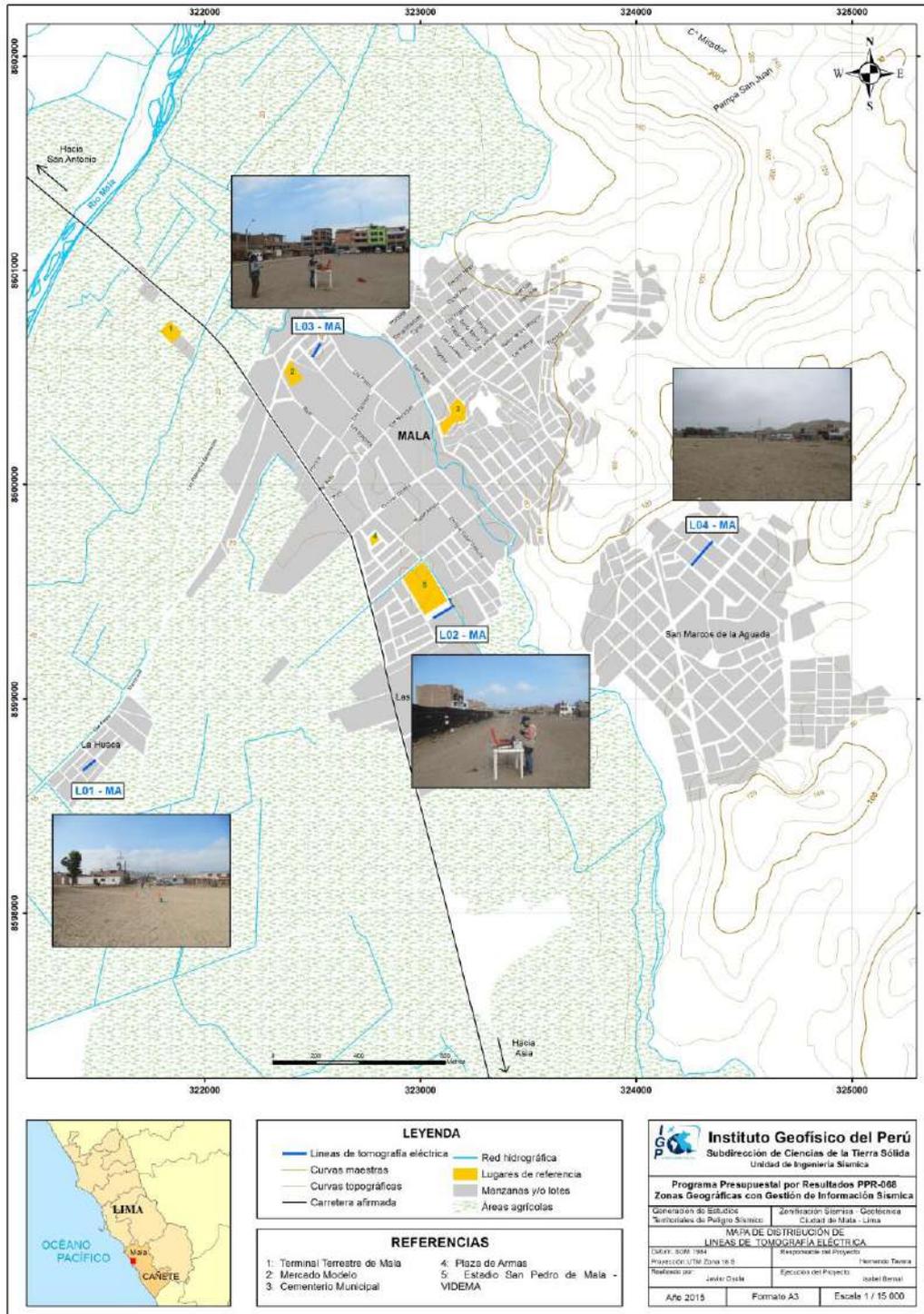


Figura 46: Mapa de la ciudad de Mala y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-MA, ..., LE04-MA.

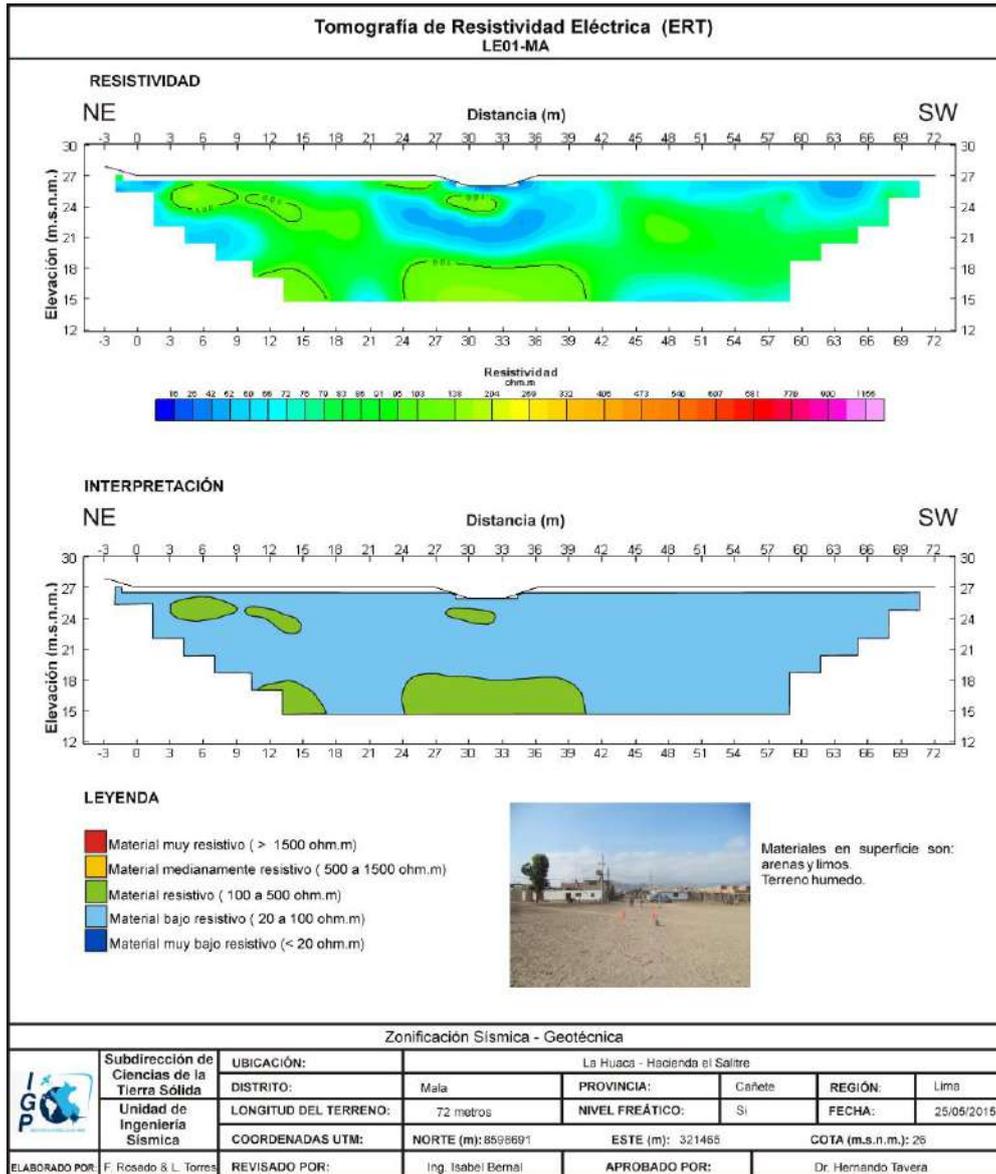


Figura 47ª: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-MA.

- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-MA: Realizada próxima a la VIDENA, extremo centro-sur del área urbana de Mala. La profundidad de exploración es de 17 metros con el predominio de valores medianamente resistivos a lo largo de toda la línea. Valores de resistividad entre 101 a 500 ohm.m son observados cerca de la superficie y a diferentes niveles de profundidad. Valores de resistividad entre 501 a 1499 se encuentran distribuidos de manera horizontal a lo largo de toda la línea con espesores y profundidades diferentes. Estos valores pueden ser asociados a la presencia de material de desmote en la zona (Figura 47b). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena, limos, gravas y desmote.

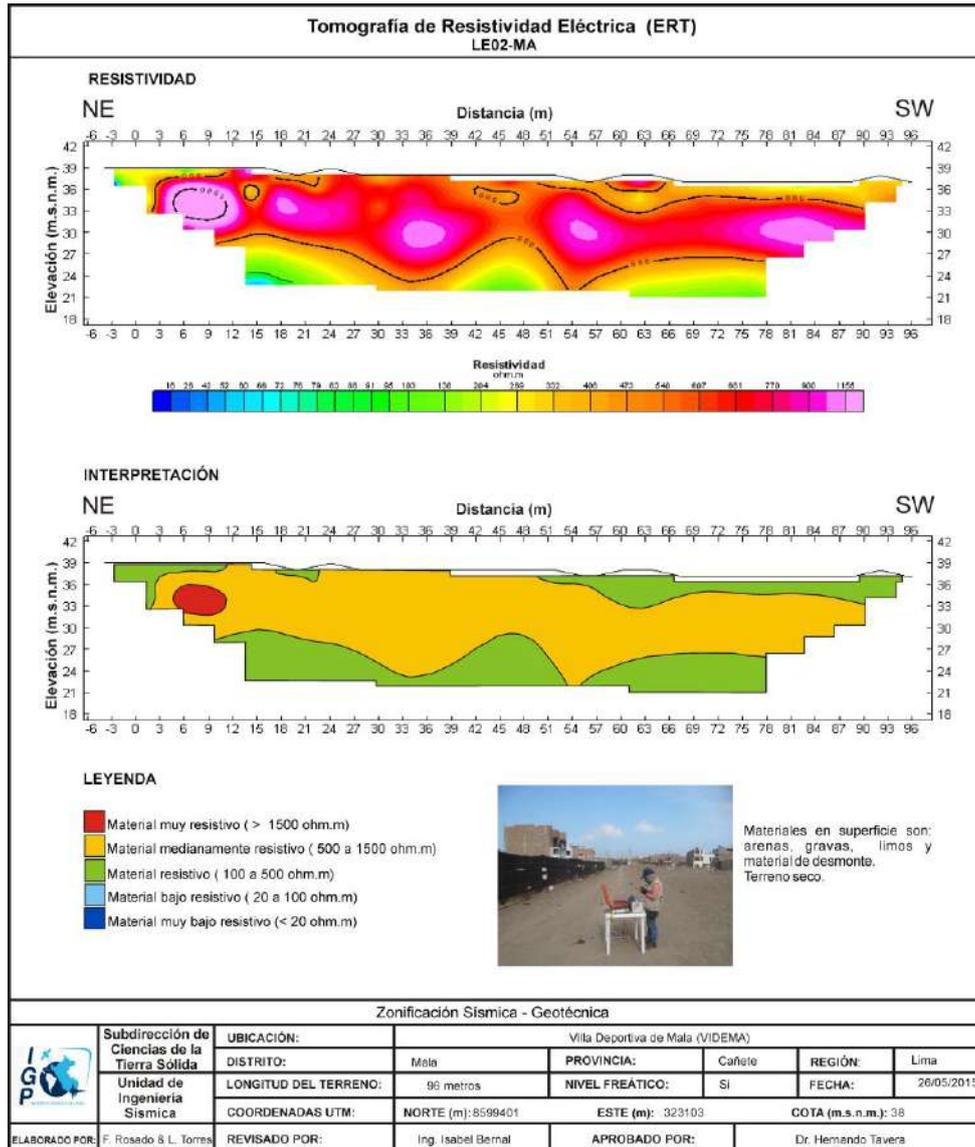


Figura 47b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE02-MA.

.- Línea de tomografía eléctrica LE03-MA: Realizada en el paradero de Calango a espalda del mercado Antari Castillo, extremo norte del área urbana de Mala. La profundidad alcanzada es de 12 metros con el predominio de valores medianamente resistivos a lo largo de la línea. Asimismo, se observa valores mayores a 1500 ohm.m entre las estaciones 3 y 11, variando en espesor y niveles de profundidad. Valores menores de resistividad -entre 501 y 1490- se observan en superficie con un espesor aproximado de 6 metros, y a lo largo de toda la línea, estación 57. Valores menores a 500 ohm.m se observan en la parte superficial del tendido para luego estar presentes en profundidad y extenderse en toda la línea (Figura 47c). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena, limos, gravas y desmontes. Todos sobre una superficie seca.

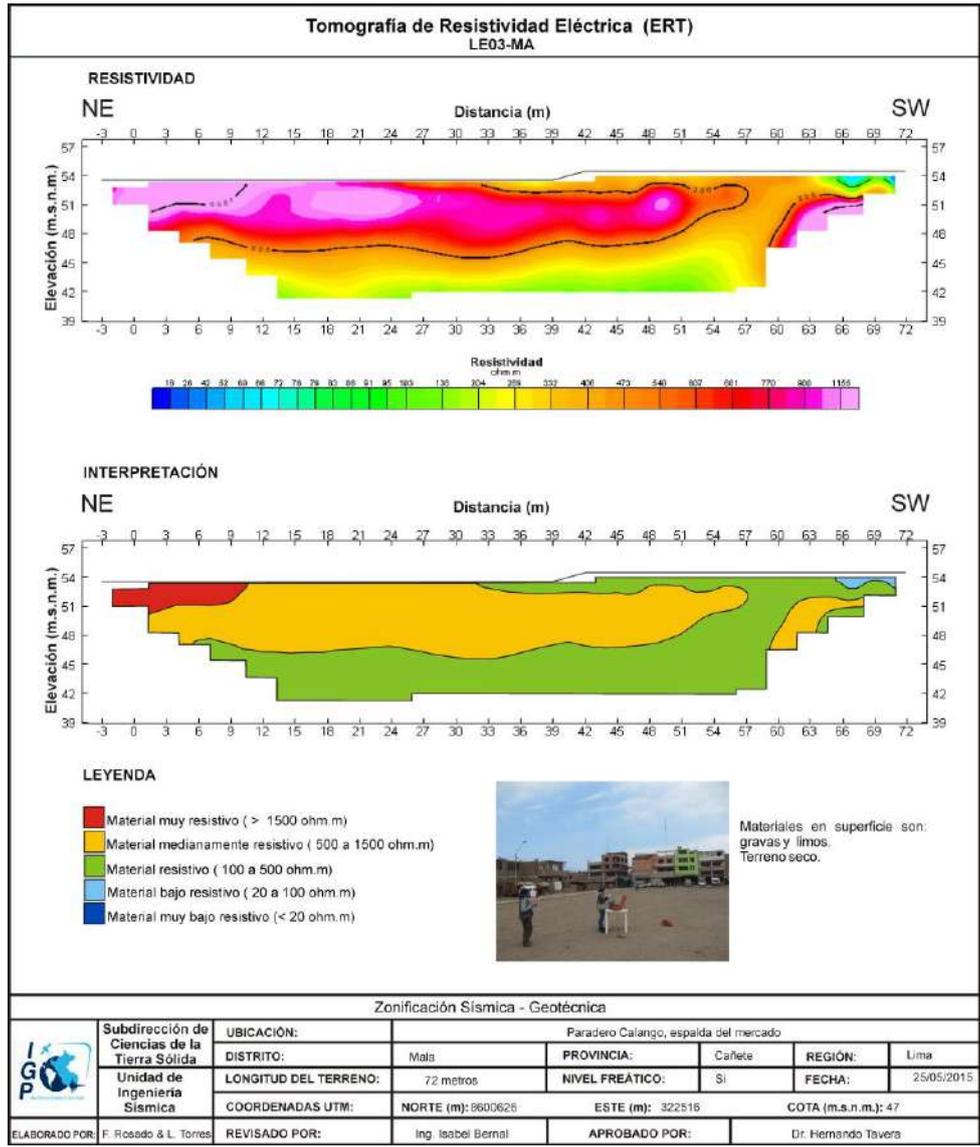


Figura 47c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE03-MA.

.- Línea de tomografía eléctrica LE04-MA: Realizada en La Aguada, extremo sureste del área urbana de Mala. La profundidad alcanzada es de 24 metros con el predominio de valores resistivos. En superficie se observa la presencia de valores de resistividad menores a 100 ohm.m, al inicio de la línea y desde la estación 72 hasta el final de la línea a mayor profundidad. Entre las estaciones 18 a 72 los valores de resistividad son mayores a 100 ohm.m y entre las estaciones 20 a 50, se observa la presencia de un ovoide de espesor variable y con valores de resistividad mayores a 500 ohm.m. Estos mismos valores están presentes a mayor profundidad entre las estaciones 65 a 84 (Figura 47d). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena y gravas.

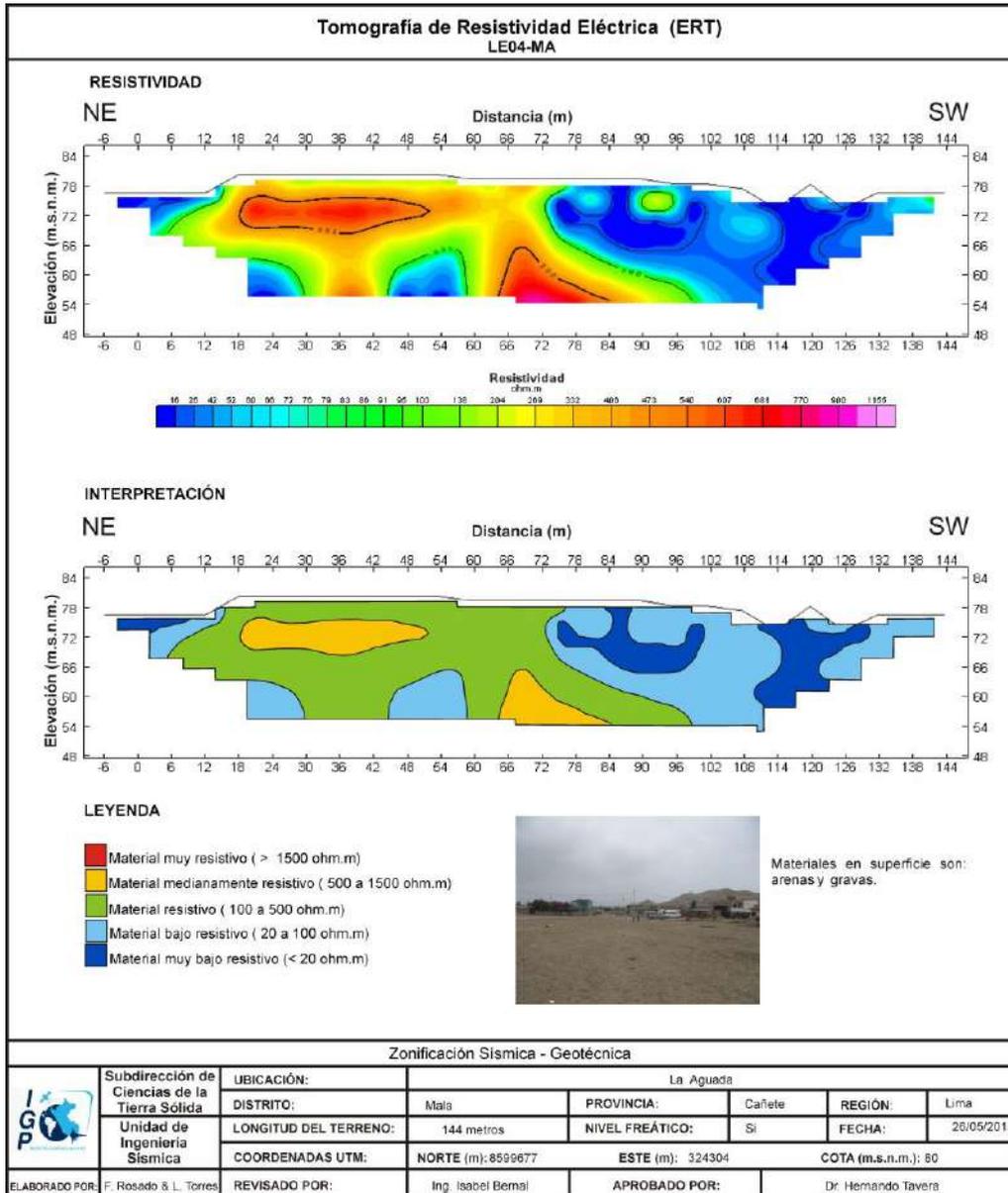


Figura 47d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE04-MA.

Los resultados obtenidos en tomografía eléctrica evidencian la presencia de valores bajos resistivos en la Urb. La Huaca, los cuales estarían asociados a la presencia de humedad y suelos con contenido de salitre. En los extremos Norte y Sur del área céntrica de la ciudad de Mala, los suelos presentan alta resistividad a niveles superficiales, lo cual podrían estar asociados a la presencia de depósitos de desmonte. Contrariamente, en la Urb. San Marcos de la Aguada, se obtiene valores mayores de resistividad hasta los 20 metros de profundidad para luego tender a valores menores.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Mala y alrededores considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Mala, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de suelos Tipo S1 y S2; es decir, suelos rígidos a semirrígidos.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Mala se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 48):

*.- **ZONA I:** Esta zona abarca el extremo NE del área de estudio, la misma que está conformada por estratos de grava coluvial-eluvial que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Estos suelos tienen un comportamiento semi-rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. En esta zona la velocidad de las ondas de corte (V_s), para la capa más superficial, varía entre 300 y 500m/s. Asimismo, la zona presenta suelos con capacidad portante de media a alta (2-3 kg/cm²). Sobre el mapa, con un color verde más claro, se delimita la zona donde se concentran periodos de 0.3 segundos, coincidiendo con áreas donde se canalizan los flujos de detritos.*

*.- **ZONA II:** Considera las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 15 y 30 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Los periodos predominantes del terreno son de 0.4 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte (V_s) de 180 a 300 m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de baja a media.*

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

El área urbana de la ciudad de Mala se asienta sobre una terraza aluvial conformada por depósitos aluviales (gravas, arenas y en menor proporción limos) que sobreyacen a un substrato rocoso conformado por rocas intrusivas de la Superunidad Jecúan (Dioritas y Tonalitas) que afloran en los sectores oriental (Santa Rosa) y norte (extremo de dignidad Nacional) de la ciudad de Mala.

En el área de estudio se ha identificado eventos geodinámicos del tipo caída de rocas debido a la interacción de factores antrópicos (construcción de un estanque de agua en una colina) y que podrían afectar la seguridad física de los pobladores que se ubican en la parte baja de la colina ubicada en el extremo norte de la ciudad

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Mala ha permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de suelos Tipo S1 y S2; es decir, suelos rígidos a semirrígidos.

RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales y regionales de la ciudad de Mala 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 Mala.

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.
- Autoridad Nacional del Agua, ANA (2011) - Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Chancay – Huaral.
- APESSEG (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): 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.
- 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.
- Dale D. (1990). Mountain waves and Downslope Winds. Meteorological Monographs. 23:59 81
- Dorbath, L., Cistermas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- 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
- Felicísimo, M. (1994) - Modelos digitales del terreno. Oviedo-España: Pentalfa. 222 p. ISBN: 84-7848-475-2. 222 p.
- Fidel, L., Zavala, B., Núñez, S., Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 29. 383 p.
- INDECI (2008) - Mapa de peligros, plan de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación de San Vicente de Cañete, Imperial y Nuevo Imperial, INDECI-PNUD-PER/02/051-Ciudades sostenibles.
- INDECI (2002) - Mapa de peligros, plan de usos del suelo y propuesta de las medidas de mitigación de los efectos producidos por los desastres naturales de las ciudades de la Provincia de Cañete.
- INGEMMET (1985) - Estudio Geodinámico de la Cuenca del río Cañete. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 8. 172 p.
- 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 Educación, 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.
- 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
- INDECI (2001): Informes de los principales desastres ocurridos en Perú. Instituto de Defensa Civil del Perú.

- 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.
- Salazar, H. & Landa, C. (1993) - Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chinchá, Tantará y Castrovirreyna. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 44. 105 p.
- 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
Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015) - <http://renac.mtc.gob.pe/inventarivial/default2.aspx>
- Ministerio de Agricultura – Instituto Nacional de Recursos Humanos (INRENA), (2007). Evaluación de los Recursos Hídricos de la Cuenca del río Mala.
- 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 (2016): 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.
- Palacios, O., y Caldas, J., y Vela, C., INGEMMET (1992) - Geología del Cuadrángulo de Chancay – Hoja 24i.
- 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.
- Salazar, H. y Landa, C. (1993) - Geología de los cuadrángulos de Mala, Lunahuaná, Tupe, Conayca, Chinchá, Tantará y Castrovirreyna. INGEMMET, Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 44. 105 p.

- 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
- 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, H. (2014). Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- 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.
- Villota, H. (1991) - Geomorfología de relieves montañosos, colinados y ondulados. IGAC. Santa Fé, Colombia. 212 p.

MAPAS