



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 LUNAHUANÁ

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima - Perú

2016

# ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE LUNAHUANÁ

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

Mariana Vivanco

Kelly Pari

Segundo Ortiz

Liliana Torres

Roberth Carillo

Fabiola Rosado

Julio Lara

Lizbeth Velarde

Christian Chiroque

Luz Arredondo

Héctor Lavado

Javier Oyola

Pilar Vivanco

Henry Salas

John Chahua

Orlando Hanco

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 de la ciudad de Lunahuana, 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 Lunahuaná han permitido identificar la existencia de dos tipos de suelos codificados como Tipo S1 y S4, y de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), corresponden a las ZONAS I y IV.*

*El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Lunahuana 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 LUNAHUANA

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 tectónico

9.1.1.2.- Origen denudacional

9.1.1.3.- Origen depositacional

9.1.1.4.- Origen fluvial

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología regional

9.2.2.- Geología local

### 9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimiento en masa

9.3.2.- Inundaciones

## 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: Fichas de Geodinámica

ANEXO 7: 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 sobre el cual se levantan las ciudades y/o futuras áreas de expansión. Para ello se realiza la aplicación de diferentes metodologías que consideran información sísmica, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente ([www.acerosarequipa.com](http://www.acerosarequipa.com)):

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

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

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

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

## 2.- OBJETIVOS

El 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 Lunahuana, 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 de la Plaza de Armas de la ciudad de Lunahuana

### 3.- DISTRITO Y CIUDAD DE LUNAHUANÁ

Lunahuaná es uno de los 16 distritos que conforman la provincia de Cañete, departamento de Lima, perteneciente a la Región Lima. Limita por el NO con el distrito de Nuevo Imperial, por el NE con el distrito de Pacarán y por el SO con San Vicente (Figura 2). Tiene una superficie de 500,33 km<sup>2</sup> y una población de 4,567 habitantes (censo 2007).

Históricamente, se dice que los Incas en su ambición por conquistar tierras, al desplazarse de la sierra a la costa, junto al mar se encontraron con un Señorío muy rico, estimado y temido entre sus vecinos: Los Guarcos, que habitan lo que hoy es la provincia de Cañete. Estos al negarse ser conquistados por los Incas, obligo al Inca Tupac Yupanqui a construir un cuartel general en INCAWASI para afianzar sus tropas. Posteriormente, con la llegada del Inca Pachacutec, la zona sirvió de escenario para propinar una tremenda paliza a quienes se resistían a la causa del Inca o RUNAHUANA. Este vocablo quechua puede ser traducido como “el que escarmienta a los hombres” y llevada al castellano, queda como Lunahuana.

Posteriormente, en la época de la Colonia, Lunahuaná fue el lugar de aposento de los máximos jefes del virreinato y le dieron tal importancia, que en dicha quebrada construyeron un imponente Templo Católico Colonial, hoy convertido en un atractivo turístico para la provincia de Cañete. Con la iniciación de la vida republicana en el Perú, se crean los departamentos y provincias, entre ellas Cañete, inicialmente con ocho distritos, destacando el distrito de Lunahuana como parte de ella. Este hecho fue legitimado por el General José de San Martín, mediante Decreto Supremo del 04 de agosto de 1821. El 11 de noviembre de 1899 es elevada a la jerarquía de Noble y Leal Villa de Lunahuaná; mientras que, el 25 de diciembre de 1985 es declarada “Capital Turística y Cultural de la Provincia de Cañete”.

Actualmente, Lunahuana integra a 11 anexos: Ramadilla, Con-Con, Lúcumo, Sosci, Paullo, San Jerónimo, Langla, Jita, Condoray, Uchupampa y Catapalla. Asimismo, mas del 60% de su población se dedica a labores agrícolas y en la actualidad, se ha convertido en un centro poblado importante para el turismo.

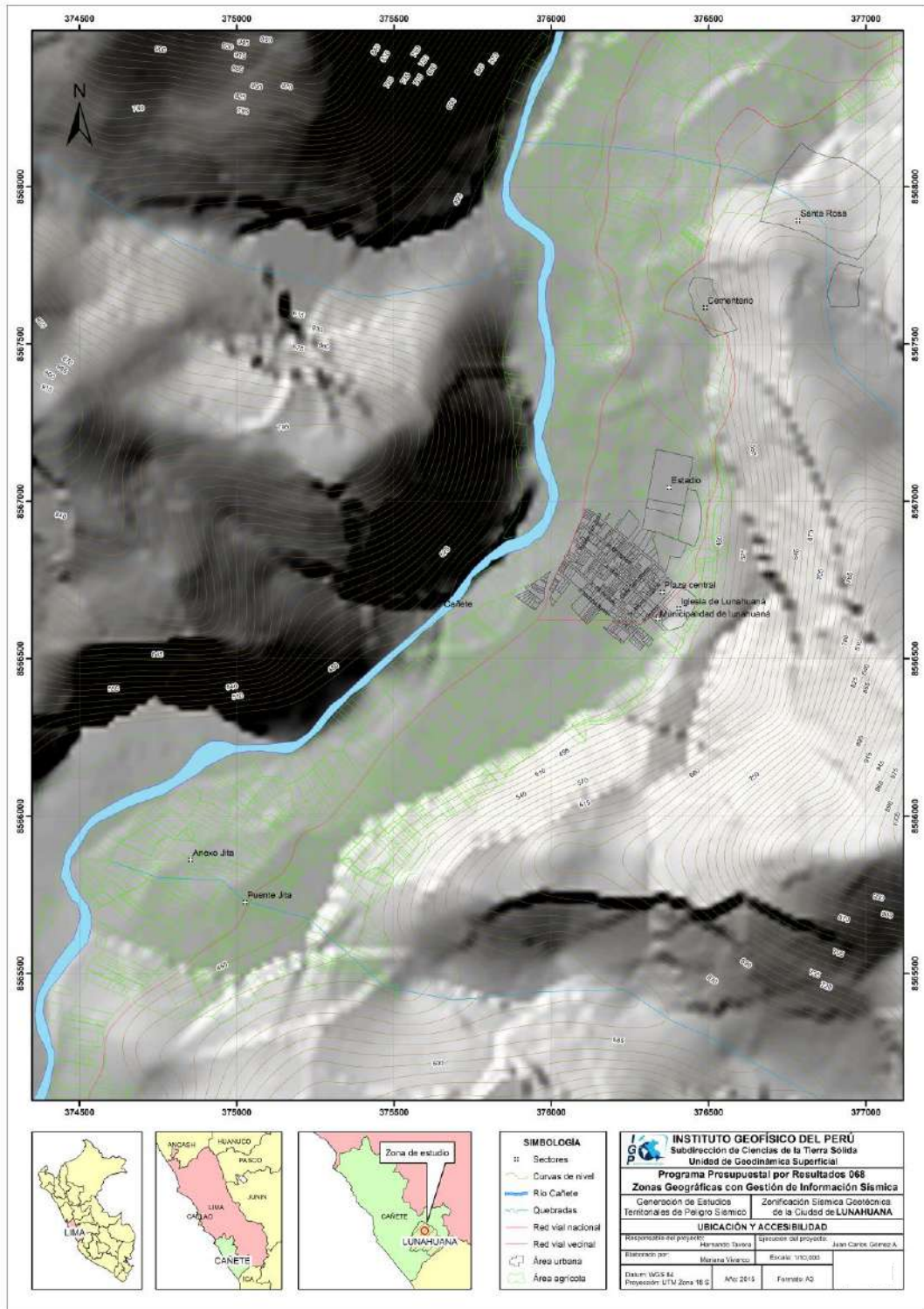


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Lunahuaná

### **3.1.- Aspectos climáticos**

La ciudad de Lunahuaná presenta clima seco y temperaturas media anual de 21°C aproximadamente. Entre los meses de diciembre a abril (verano), la temperatura máxima es de 32°C y entre los meses de julio a noviembre de 14°C (INDECI, 2012).

#### 4.- ANTECEDENTES

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

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.

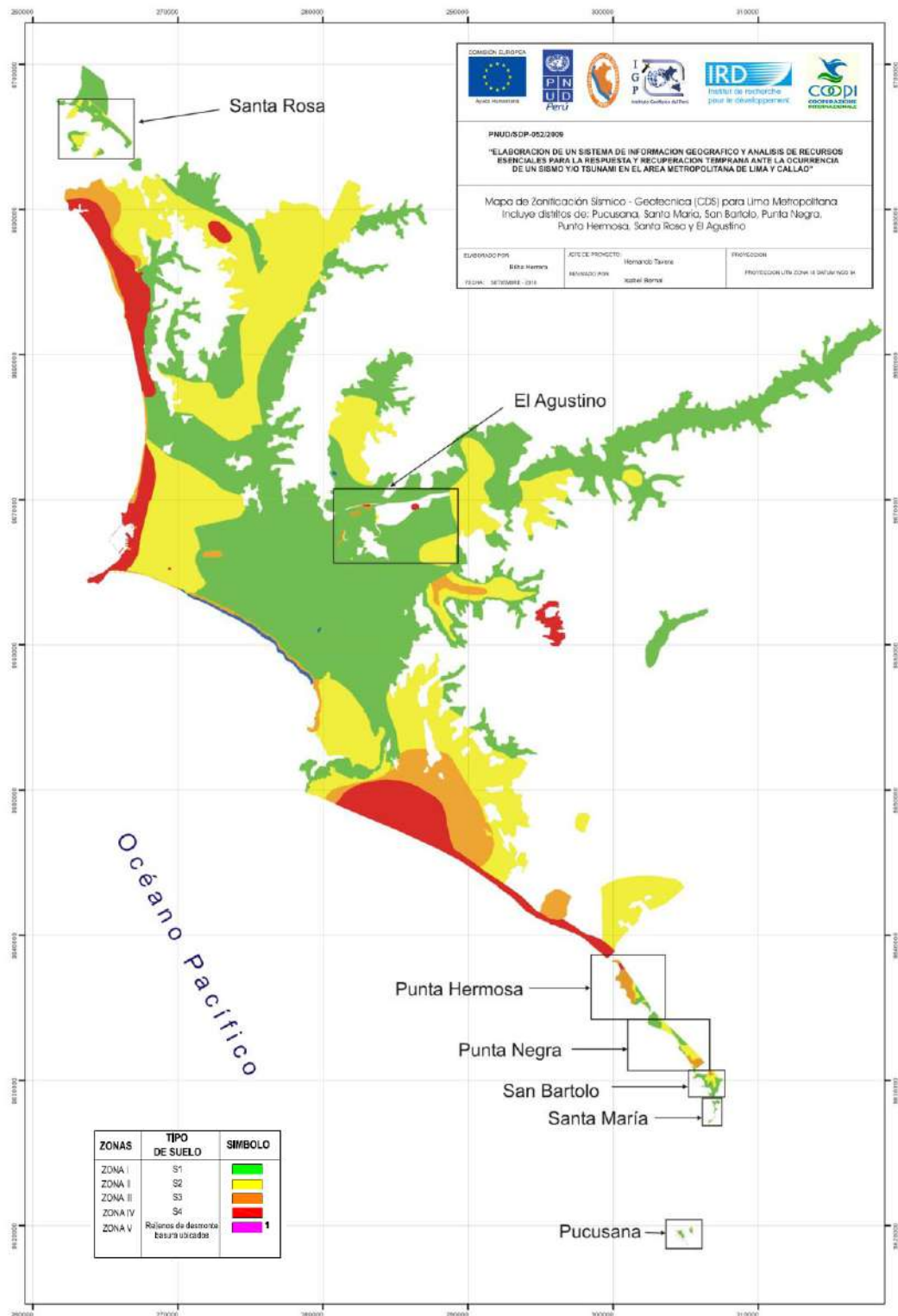


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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, Lunahuaná 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 Lunahuaná son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica del área urbana de la Ciudad de Lunahuaná”.**

#### **4.1.- Estudios previos**

Para la ciudad de Lunahuaná, 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 a los siguientes:

**Ministerio de transportes (MTC)-CESEL Ingenieros,(2010):** *“Estudio Definitivo de la Rehabilitación y Mejoramiento de la carretera Cañete-Lunahuaná, Contrato de Consultoría de Obra N° 0051-2010-MTC20”*: El informe indica que se realizaron dos perforaciones diamantinas en el puente Jita como parte de los proyectos “Puente Jita-Estribo Izquierdo, de codificación “SD-03”, coordenadas UTM PSAD 56 375062(E)-8565760 (N)” y “Puente Jita- Estribo derecho, de codificación “SD-04”, coordenadas UTM PSAD 56 375082(E)-8565774 (N). En ambos casos, la profundidad de investigación fue de 25 m.

De estos estudios, se ha tomado en cuenta los estratos de 2 a 4 m obtenidos con perforaciones diamantinas a fin de ser correlacionados con los estudios geotécnicos realizados en la ciudad. La información que aporta es la siguiente:

*SD-03: entre los 2 a 3.60 m de profundidad corresponden a depósitos fluviales compuestos por gravas pobremente gradada, de forma sub redondeada a redondeada, de compacidad medianamente densa y matriz de arena de grano medio a fino, grava de 3", denominación SUCS: GP y con contenido de humedad 0.52%. Por debajo y hasta los 25 metros de profundidad, se identificó la presencia de gravas pobremente gradadas envueltas en matriz limosa a arenosa, de compacidad densa, con cantos de 8" de tamaño máximo. Los clastos muestran formas angulosas producto del fisuramiento de bloques.*

*SD-04: entre los 2.20 a 5.70 m de profundidad corresponden a depósitos aluviales conformados por gravas pobremente gradadas con arena, de forma redondeada a sub redondeada, de compacidad medianamente densa, matriz de arena de gran medio y limo, grava de 3" de tamaño máximo y cantos aislados de 4" de tamaño máximo, denominación SUCS: GP, con contenido de humedad de 1.41%. A mayor profundidad, se identificaron gravas pobremente gradadas envueltas en matriz limosa a arenosa con presencia de cantos de hasta 7" con formas angulosas que evidencian fracturación.*

**Autoridad Nacional del Agua (ANA), Ministerio de Agricultura (2010)** “Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico” de la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos: El informe indica que se estimó los caudales de máximas avenidas en la cuenca del río Cañete (653.98 m<sup>3</sup>/s) y caudales máximos históricos registrados (550 m<sup>3</sup>/s) por la estación hidrométrica Socsi con un período de 42 años (1968-2009).

**Vera (2013). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).** El río Cañete presentó una anomalía del 53%, con un caudal de 193 m<sup>3</sup>/s en comparación con el caudal normal de 147 m<sup>3</sup>/s”. Este dato fue utilizado como caudal de referencia para el cálculo del umbral de inundación.

**UNICA, (2002).** Programa de Ciudades Sostenibles - Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI)-Universidad San Luis Gonzaga de Ica. “Mapa de Peligros, Plan de Usos del Suelo y Propuesta de Medidas de Mitigación de los Efectos Producidos por los Desastres Naturales de las ciudades de la provincia de Cañete “San Vicente, Cerro Azul, San Luis, Imperial, Nuevo Imperial, Lunahuaná”: El informe indica que en la ciudad de Lunahuaná se realizaron calicatas a fin de conocer las propiedades granulométricas y de capacidad portante de los suelos, siendo estos clasificados como:

*Zona I: Material rocoso, la capacidad portante es mayor a 2.00 kg/cm<sup>2</sup> (material de montañas).*

*Zona II: Suelo tipo GM (grava limosa) conformado por terrenos agrícolas con capacidad portante de 1.25 a 2.00 kg/cm<sup>2</sup>. Este tipo de suelo se encuentra en el extremo norte y noroeste del área urbana de Lunahuaná.*

*Zona III: Suelo tipo GP-SP (grava pobremente gradada y arena pobremente gradada). Su capacidad portante es menor a 1.25 kg/cm<sup>2</sup> y corresponde al área urbana de Lunahuaná.*

## 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).

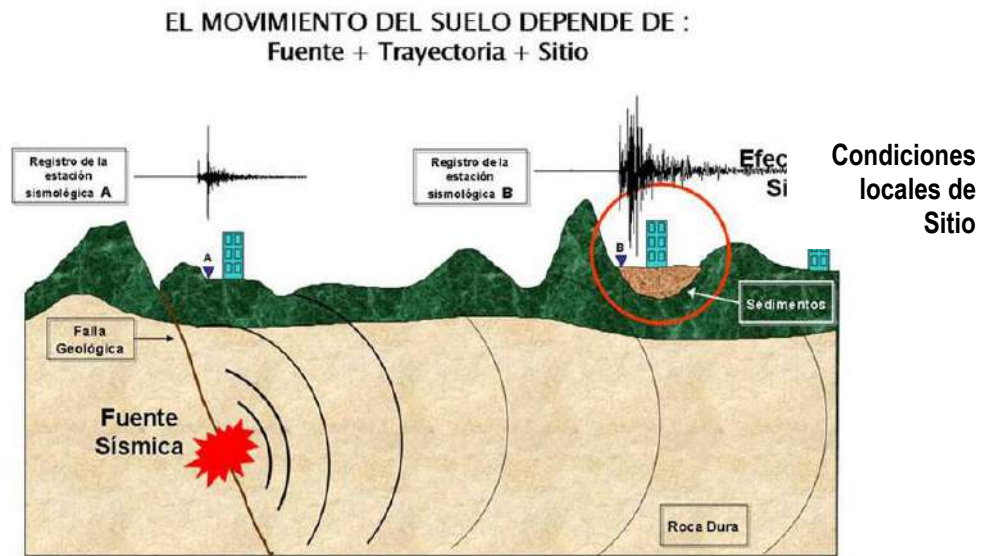


Figura 4a: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.



Figura 4b: Simulacro de sismo en colegios de Lunahuaná - Cañete.

## 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  $\lambda$ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, según la Norma E-030 (2003), en el Perú el valor de  $\lambda$  es igual a 10 y el periodo dominante para una determinada estructura puede ser estimada con solo conocer el número de pisos de cada vivienda. Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

## **7.- METODOLOGÍA**

El estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Lunahuaná 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 la ciudad de Lunahuaná (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 (Figura 5).

.- **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 (Figura 5).



Figura 5: Calicata elaborada en la ciudad de Lunahuaná y ensayo de densidad de suelo mediante el método del Cono de Arena.

.- **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 (Figura 6).



Figura 6: Posteadora y muestras obtenidas en suelos de Lunahuaná

**.- 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 7).



Figura 7: Equipos, accesorios y técnica de DPL

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

En base a la información geotécnica recopilada en las calicatas se realiza la clasificación SUCS de los suelos. Esta clasificación fue propuesta por Arturo Casagrande y sus modificaciones fueron realizadas en el año 1942, siendo actualmente la más utilizada a nivel mundial para la clasificación de suelos desde un punto de vista geotécnico. La SUCS clasifica a los suelos en:

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

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

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

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

## 7.4.- Estudios sísmicos y geofísicos

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

.- **Método de H/V:** considera como hipótesis de base que las vibraciones ambientales o microtemores generadas por la actividad humana se deben principalmente a la excitación de las capas superficiales al paso de ondas superficiales del tipo Rayleigh. El registro de esta información y su interpretación, permite conocer el periodo natural de vibración del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos resultados son correlacionados y complementados con los obtenidos de los estudios geofísicos, geológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geotécnicos. Para los registros de vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 8).



Figura 8: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en Lunahuaná: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 9, 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 LH-40 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en LH-97, 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.

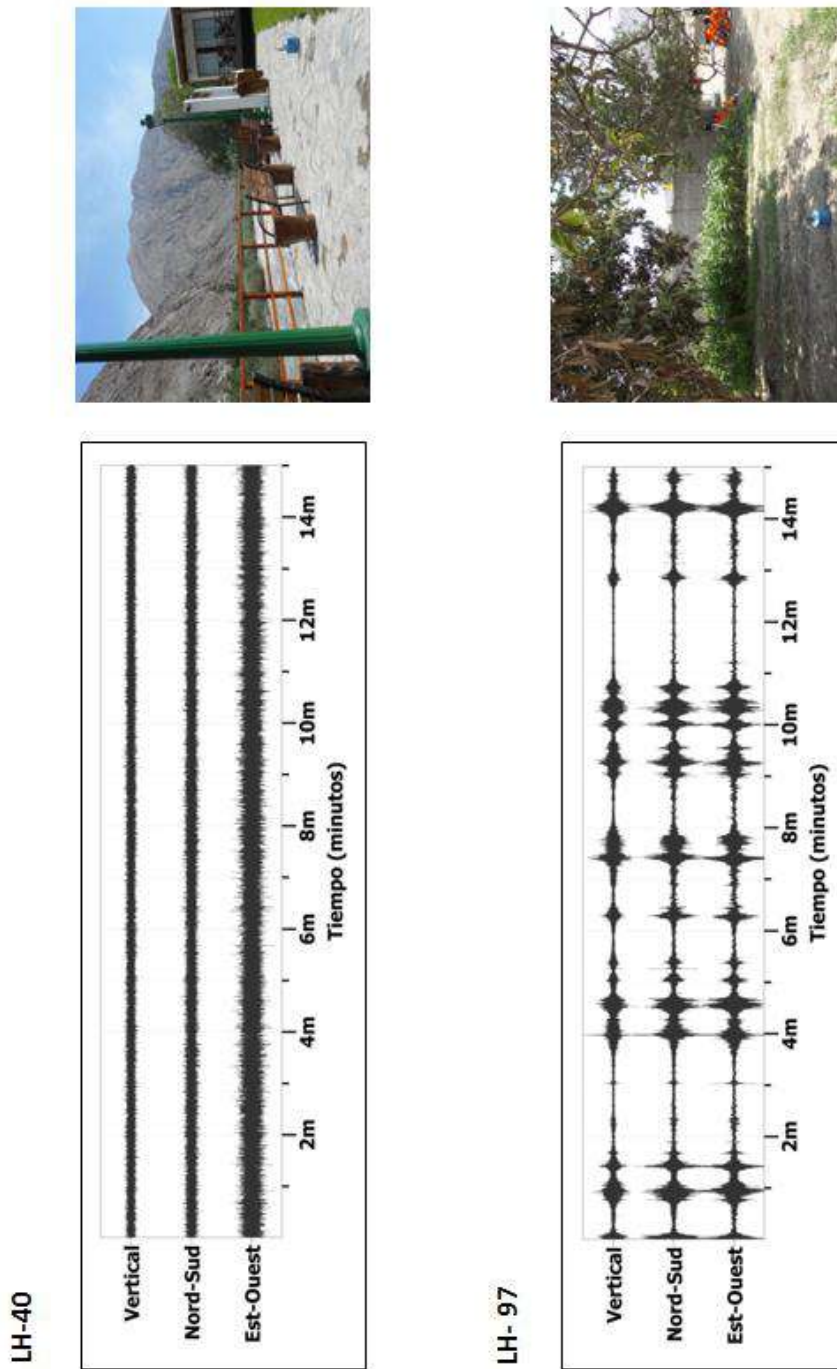


Figura 9: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (CN-278) y otro con ruido transitorio (CN-30). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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 10), las mismas

que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

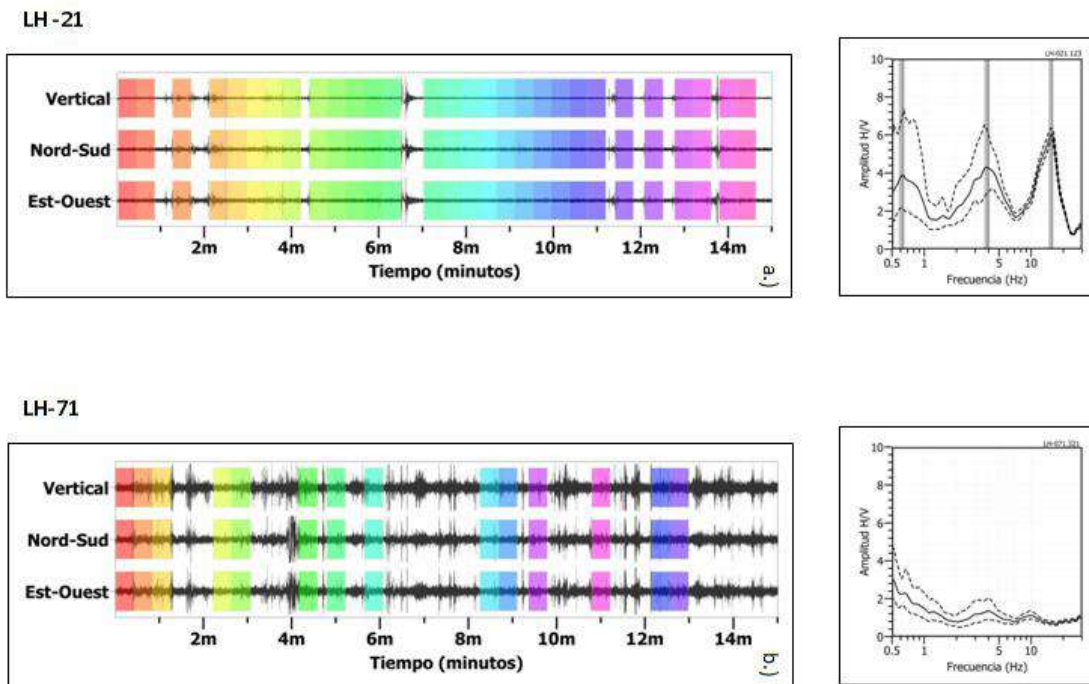


Figura 10: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. LH-21: Registros y razón H/V donde se identifica la presencia de dos pulsos predominante de gran amplitud. LH-71: Registros y razón H/V en el cual no se observa picos predominantes. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

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.*

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 11).

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.

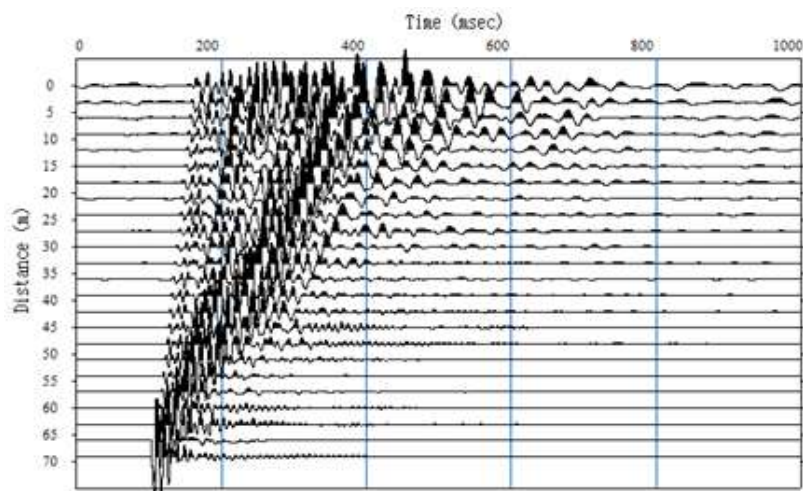


Figura 11: Disposición del equipo de refracción sísmica y trazas obtenidas en la ciudad de Lunahuaná

.- **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 12).

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 12: Disposición del equipo de prospección eléctrica en la ciudad de Lunahuaná

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 Lunahuaná 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 daños estructurales y pérdida de vidas humanas. 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 como Lunahuaná (Figura 13).

Según información histórica, los sismos que probablemente causaron daño y destrucción en el área urbana de Lunahuaná 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.

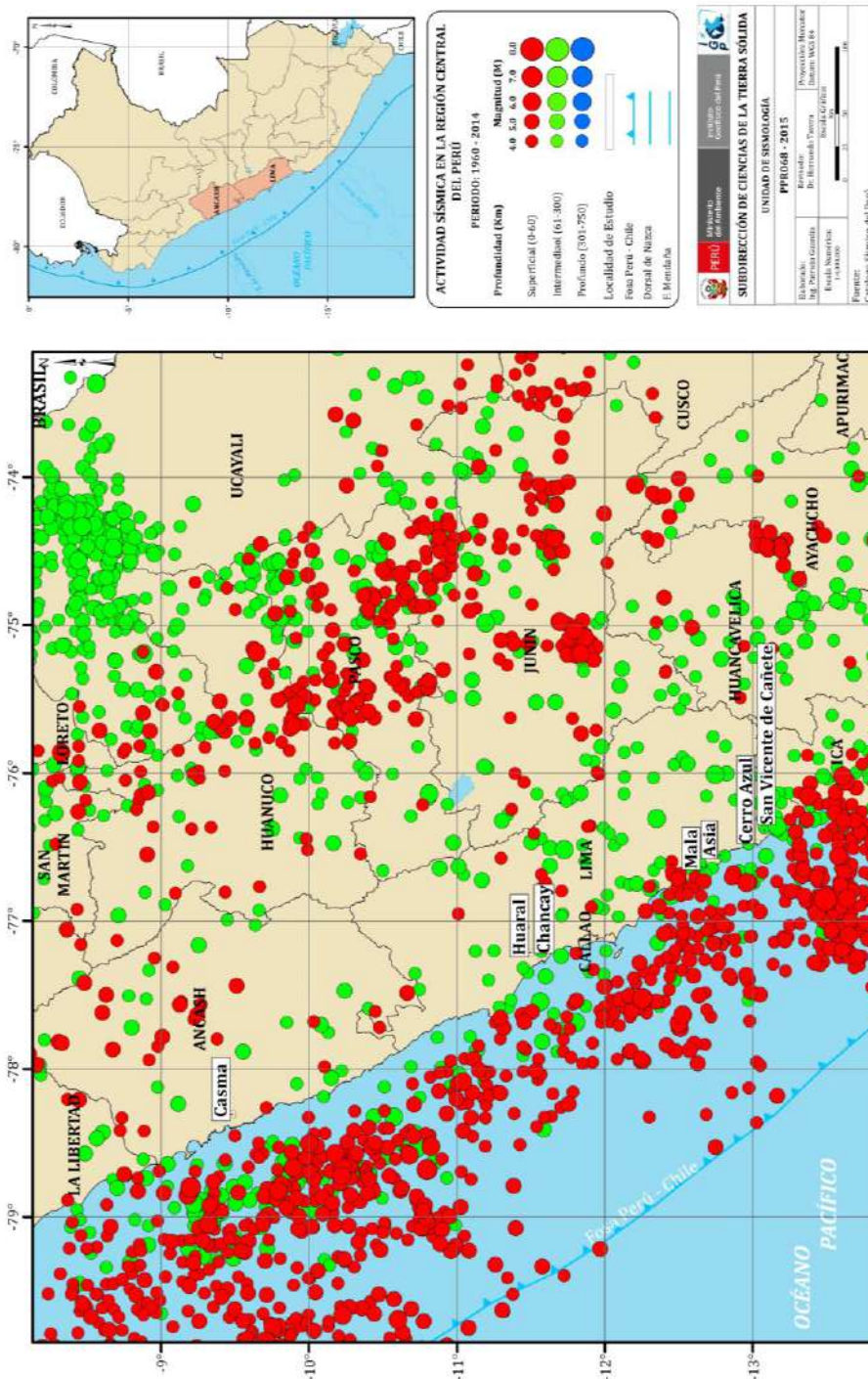


Figura 13: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región central del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

- 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 parciales en muchas viviendas en Lunahuaná. Este sismo debe ser considerado 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 Lunahuaná comprenda que los sismos 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 Lunahuaná intensidades del orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada, produciéndose daños en viviendas construidas con material de adobe y/o muy antiguas (Figura 14).*

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 al sur de Lima y norte de la localidad de Paracas, afectando con diversas intensidades a la ciudad de Lunahuaná. 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 Lunahuaná 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 15 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, Lunahuaná es una ciudad expuesta a alto riesgo para el caso de sismos. Asimismo, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que de acuerdo al monitoreo de la actividad sísmica y deformación cortical, 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 16). Esta información es corroborada por estudios realizados por Villegas-Lanza et al (2015) sobre la distribución de asperezas en el borde occidental del Perú.

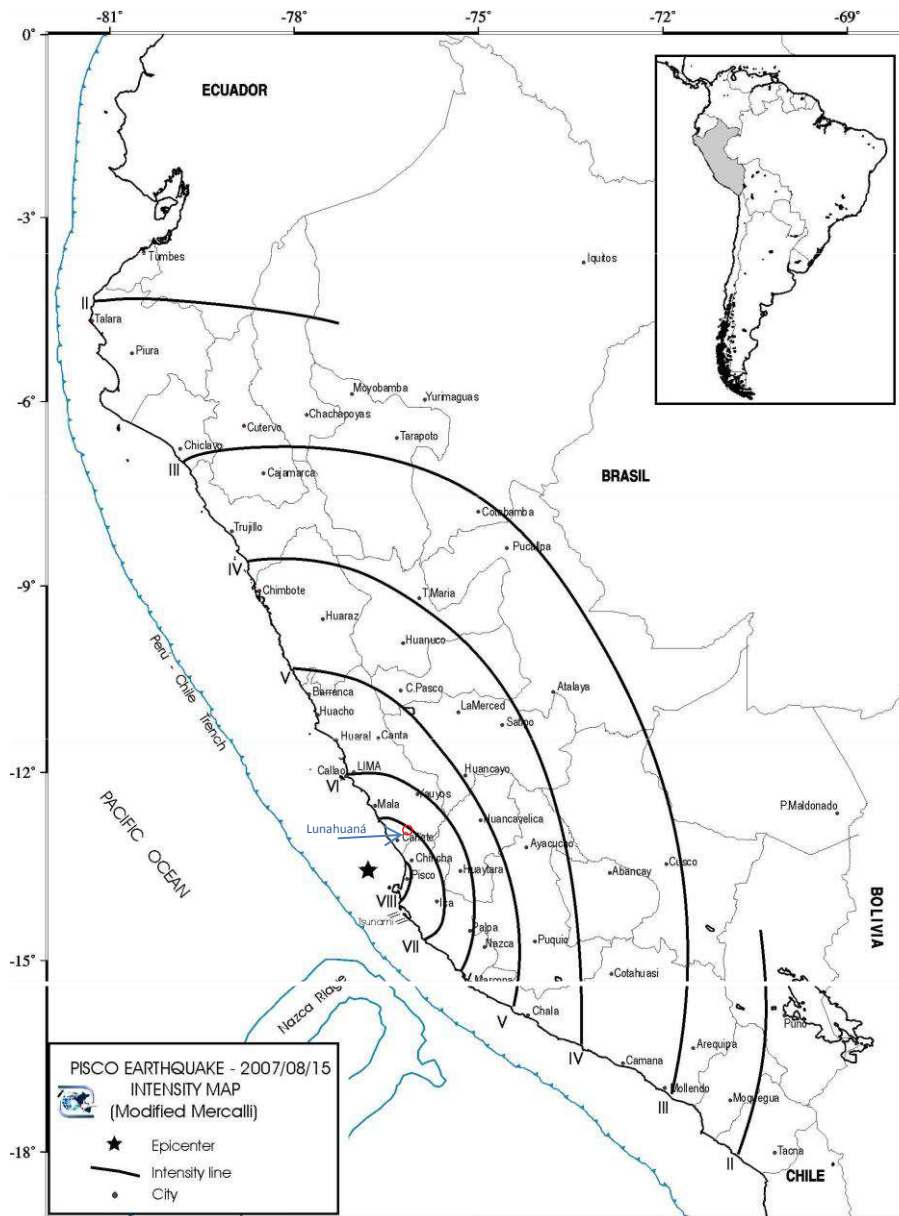


Figura 14: Mapa de isosistas para el terremoto del año 2007 que afectó a la ciudad de Lunahuaná con intensidades del orden de VI en la escala de Mercalli Modificada

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 Lunahuaná 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 Lunahuaná, se debe complementar este estudio con evaluaciones catastrales y estructurales.

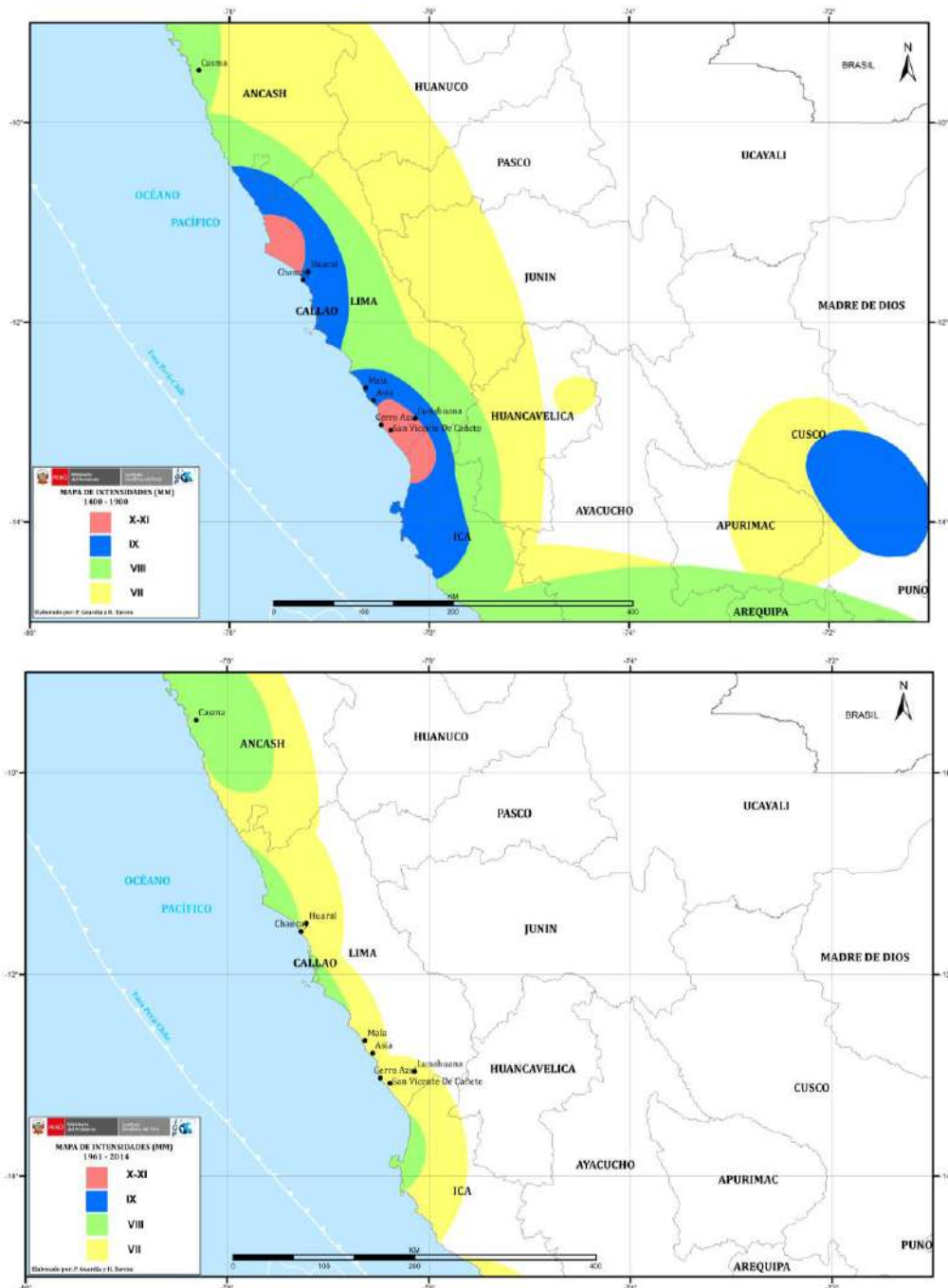


Figura 15: Mapas de isosistas (MM) correspondientes a sismos históricos (1400 – 1900) e instrumentales (1961 – 2014) ocurridos en el borde occidental de la región central del Perú

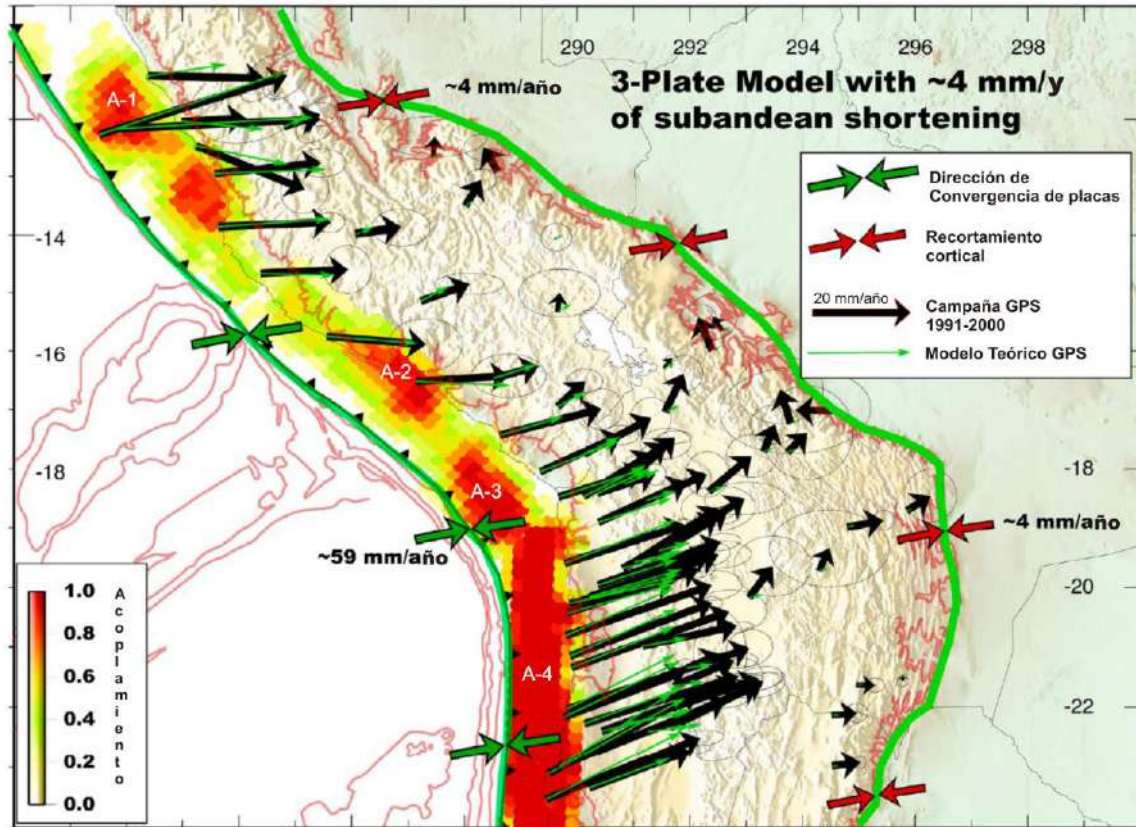


Figura 16: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de 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 Lunahuaná se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 380 a 400 gals (Figura 17), 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.

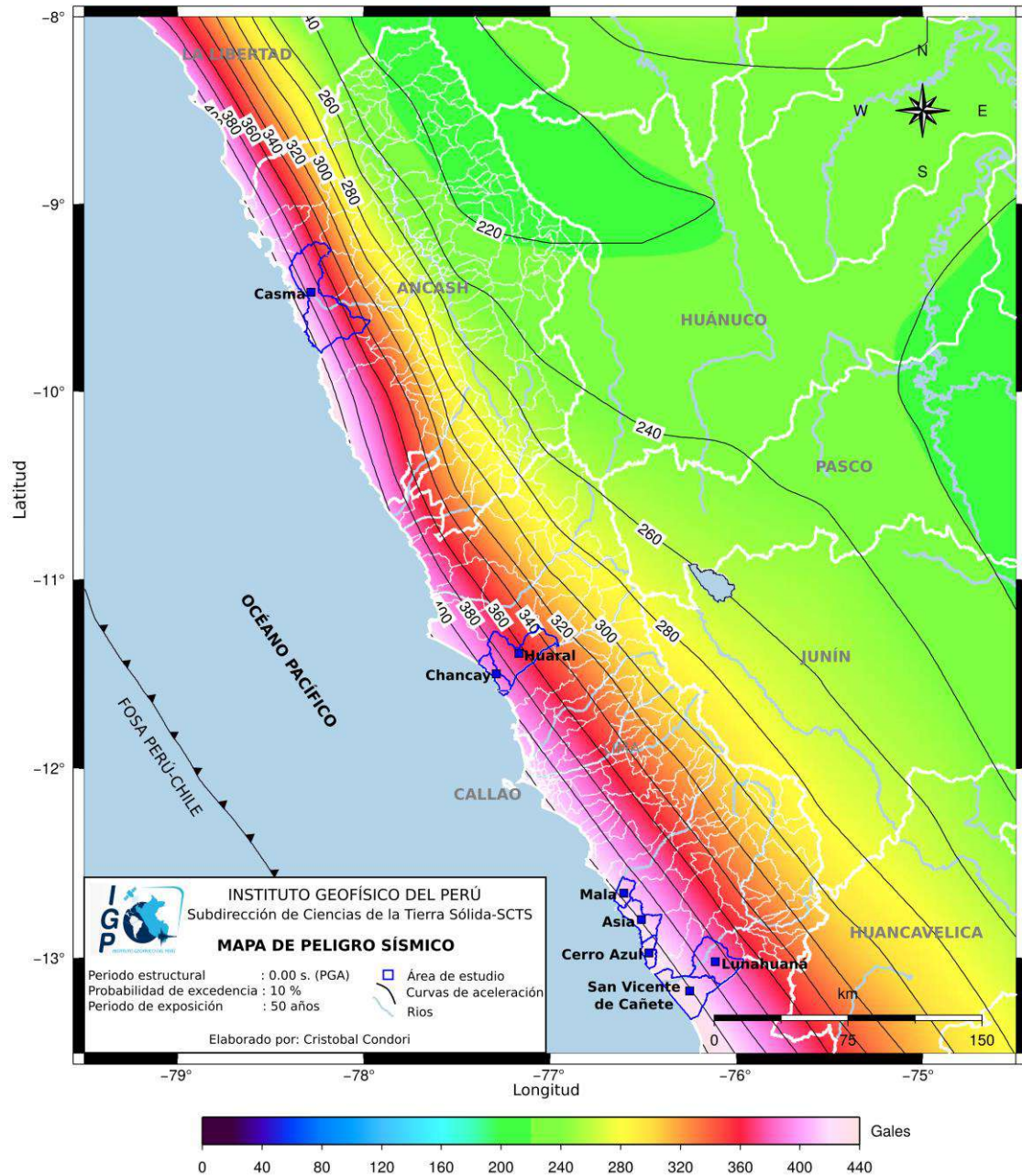


Figura 17: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

## 9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

### 9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Lunahuaná 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 Lunahuaná. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida para un área de 10 km<sup>2</sup>, y se concluye que la zona urbana de la ciudad de Lunahuaná se asienta sobre una terraza aluvial con altitudes entre 450 y 550 msnm; mientras que, en los alrededores, hacia el extremo noreste de la ciudad, se observan relieves que alcanzan alturas de hasta 1000 m.s.n.m. con respecto al área urbana (Figura 18).

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 la 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 Lunahuaná 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 Lunahuaná se encuentra asentada sobre una terraza aluvial que presenta pendientes menores a 5°; mientras que, el barrio Santa Rosa presentan pendientes entre 5° a 20°: Asimismo, las montañas presentan pendientes de 35° a 50° (Figura 19).

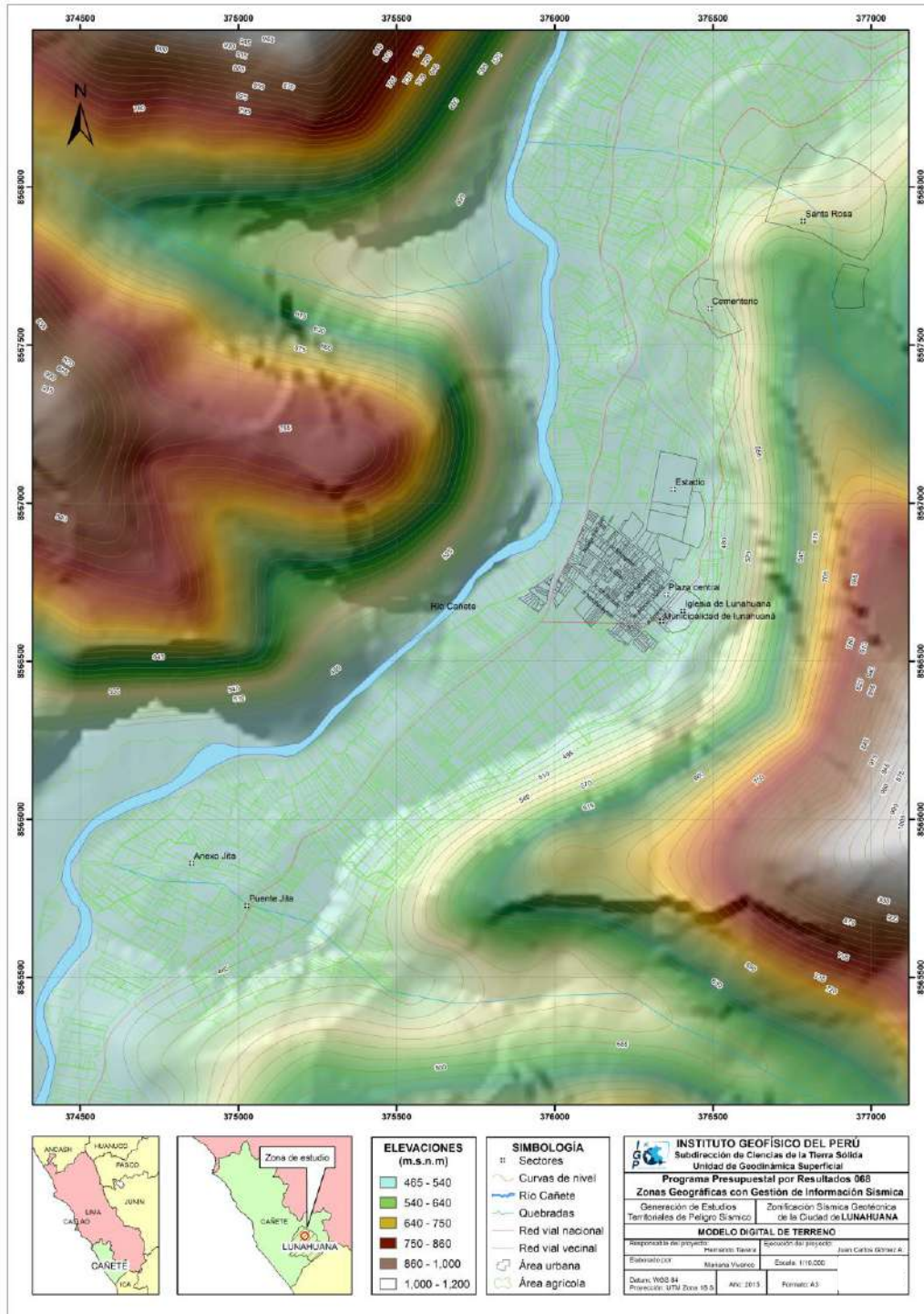


Figura 18: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Lunahuaná y alrededores



### 9.1.1. Unidades geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Lunahuaná se ha identificado la existencia de 6 unidades geomorfológicas y de acuerdo a su génesis (Villota, 1991; Tejada 1994), fueron clasificadas en (Figura 20):

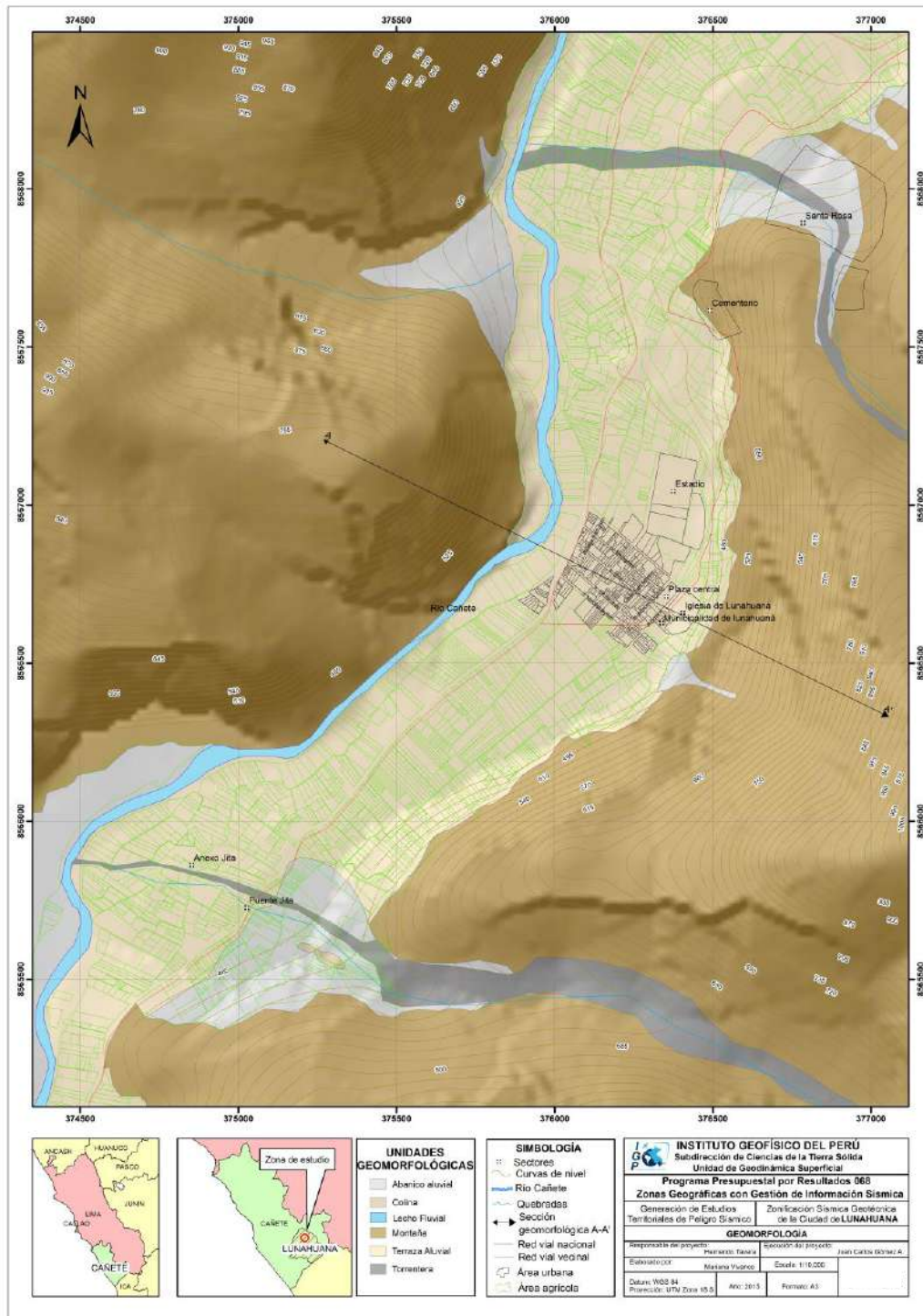


Figura 20: Mapa geomorfológico de la ciudad de Lunahuaná y alrededores

### 9.1.1.1.- Origen tectónico

Son aquellas geoformas generadas a partir de la combinación de procesos endógenos (internos) y exógenos (externos), los cuales crean cambios significativos sobre la superficie. Sin las fuerzas internas, la tierra tendría una superficie uniforme sin relieve, pero es el tectonismo el encargado de desarrollar las formas del relieve más relevantes, tal es el caso de la Cordillera de los Andes. En general, estas geoformas están sometidas a procesos de erosión, denudación y meteorización provocando el desgaste de las mismas. En la ciudad de Lunahuaná se ha reconocido la siguiente geoforma:

*.- **Montaña:** Describe a una elevación natural de terreno con relieves que presenta desniveles mayores a 300 m, así como pendientes superiores a los 30°. Se caracterizan por tener cimas que pueden ser desde agudas a tabulares y laderas de pendientes regulares a complejas (Figura 21). Estas geoformas son modificadas por las aguas superficiales y la acción del viento (erosión eólica). Esta unidad ocupa el 30 % de la zona de estudio y se ubica a ambos márgenes del río Cañete.*

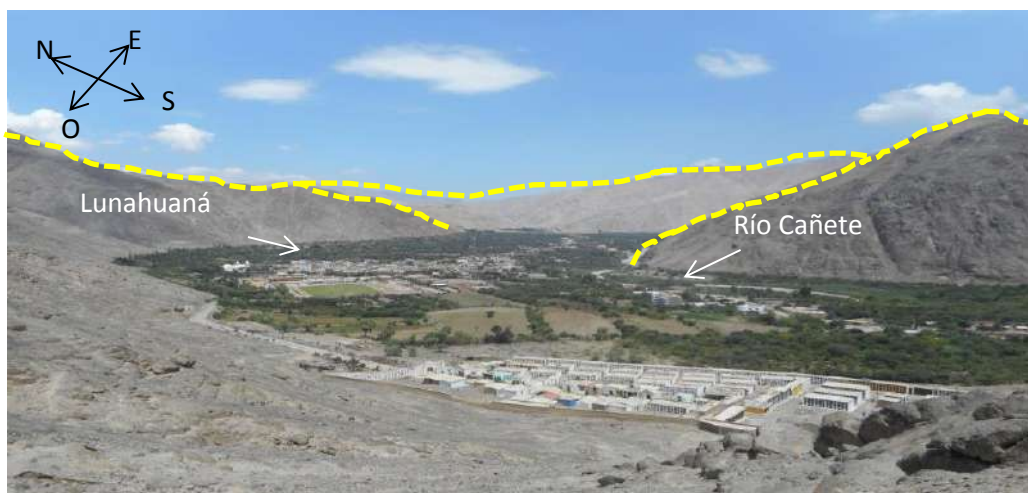


Figura 21: Montañas (líneas amarillas) ubicadas a ambos márgenes del río Cañete.

### 9.1.1.2.- 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 Lunahuaná se ha desarrollado el modelado de geoformas en rocas sedimentarias debido al accionar de agentes como el agua y el viento, dando lugar a la formación de colinas.

*.- **Lomas:** Corresponden a elevaciones topográficas de altura intermedia y pendientes menores a 25°. Se caracterizan por tener configuración basal redondeada y vertientes divergentes en todas las direcciones a partir de la cima o cumbre, Figura 22. Esta geoforma ha sido modificada por acción del viento (erosión eólica) y escorrentías de aguas superficiales. La unidad ocupa el 5 % de la ciudad, extremo suroeste del centro urbano de Lunahuaná.*



Figura 22: Colina (líneas rojas) ubicada en el extremo oeste de la ciudad de Lunahuana.

### 9.1.1.3.- Origen depositacional

Comprende geoformas resultantes de la depositación de fragmentos o sedimentos originados durante los procesos de erosión de rocas preexistentes en áreas geográficas de baja pendiente. Entre las unidades geomorfológicas que se han identificado se tiene aquellas que se encuentran relacionadas con la dinámica aluvial (terraza aluvial y abanico aluvial). La ciudad de Lunahuaná se asienta sobre una terraza aluvial con las siguientes características:

**- Terraza aluvial:** Superficie horizontal o ligeramente inclinada (pendientes menores a  $7^\circ$ ) conformada por materiales heterogéneos (clastos angulosos a sub redondeados envueltos en una matriz arenosa y/o fina) de origen intrusivo y volcánico, transportados desde la parte alta de la cuenca por el río Cañete y sus tributarios hasta depositarse en zonas de menor pendiente. La ciudad de Lunahuaná (área urbana y agrícola) se asienta sobre esta la terraza aluvial que se ubica a ambos márgenes del río Cañete. La terraza se ha formado por la acumulación y/o depositación de la carga aluvio-fluvial (río) e incisión del mismo, estando conformadas principalmente por gravas, limos y arenas. El 70 % de la terraza es utilizada para la actividad agrícola y el restante por el área urbana (Figura 23).



Figura 23: Terraza aluvial de 8 metros de desnivel con respecto al río Cañete

**- Terraza aluvial:** Superficie ligeramente inclinada (pendientes menores a  $12^\circ$ ) originada por corrientes de agua que fluyen rápidamente hasta depositarse en zonas llanas conformando un cono o abanico. En la ciudad de Lunahuaná y en un radio de 3 km, tomando como punto medio la plaza central, se han reconocido la presencia de 4 conos deyectivos a ambos márgenes del río Cañete, denominados como A, B, C y D (Figuras 24 y 25). Los conos deyectivos B y D, son utilizados como terrenos de cultivo. El 50% de la superficie del cono C está urbanizado (sector Santa Rosa) con construcciones de material precario (drawal-adobe) y el otro 50 %, está ocupado por terrenos de sembríos. El cono A conserva su estado de acumulación de material natural, puesto que aún no ha sido utilizado para terrenos de sembrío ni ocupación urbanística. Estos abanicos están constituidos por materiales heterogéneos (clastos angulosos a sub

redondeados en matriz areno arcillosa). Esta unidad ocupa el 15% de la ciudad de Lunahuaná.



Figura 24: Ubicación geográfica de los abanicos aluviales en la ciudad de Lunahuaná (Google Earth)

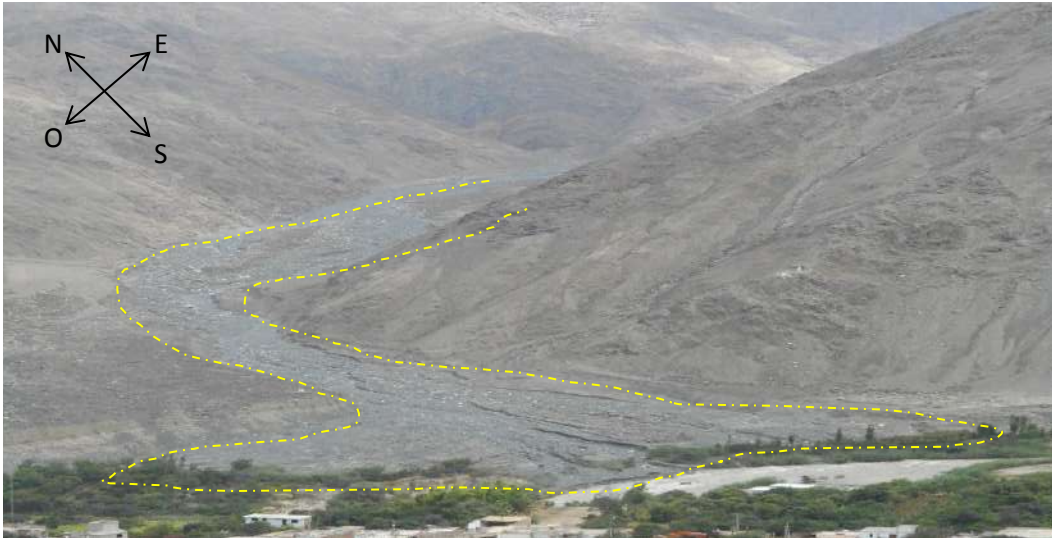


Figura 25: Cono aluvial A compuesto por gravas que desembocan en el río Cañete

#### 9.1.1.4.- Origen fluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968). Esta crea una gran parte del relieve formando llanuras de inundación en las que se construyen muchas de las ciudades. Los ríos son esencialmente los agentes de erosión y transporte que suministran a los océanos agua y sedimentos procedentes del continente. A pesar de que  $<0.005\%$  del agua continental se encuentra en los ríos en un momento determinado, el flujo del agua es una de las fuerzas más importantes que operan en la superficie terrestre (Knighton, 1998). 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 lacustres o marinos. Asimismo, 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).

La ciudad de Lunahuaná se asienta en el margen izquierdo del valle del río Cañete, sobre una terraza aluvial a la cual la disecta el río del mismo nombre. De igual forma se ha identificado la presencia de torrenteras con origen en las montañas para luego desembocar en el río Cañete.

.- **Lecho aluvial:** Corresponde a las áreas por donde frecuentemente discurren las corrientes de aguas permanentes. En Lunahuaná, el río Cañete es de curso permanente, su nacimiento está en el nevado Ticlla a 4830 m.s.n.m, su dirección de desplazamiento es de Este-Oeste en forma semi meándrica. En el área de estudio recorre aproximadamente 4 km con una pendiente de 2° aproximadamente. En su recorrido transporta materiales (gravas, arenas y limos) por arrastre, saltación y rodamiento (Figura 26). Esta geoforma ocupa el 10 % de la superficie de la ciudad de Lunahuaná.

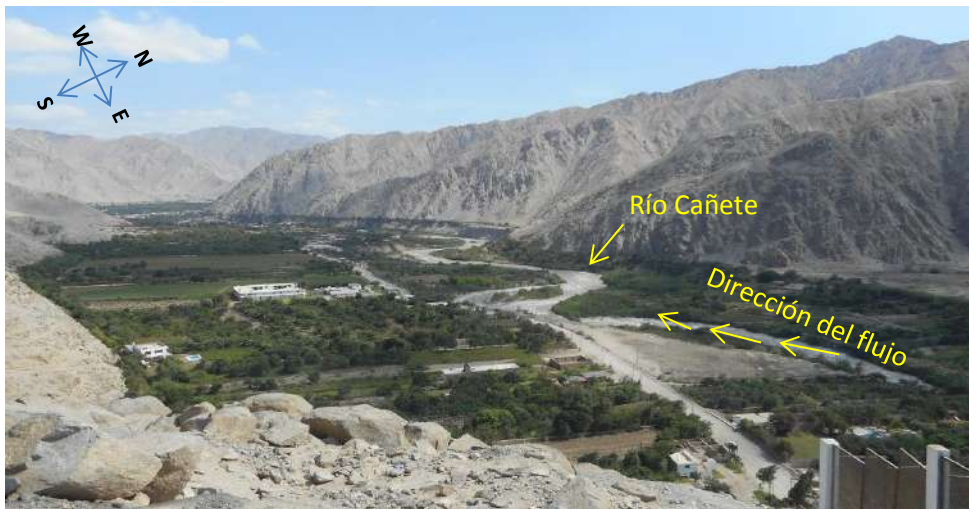


Figura 26: Flujo hídrico permanente del río Cañete y caudal controlado por la Central Hidroeléctrica El Platanal.

.- **Torrenteras:** Son cursos de agua que circulan esporádicamente, delimitan planos inclinados de regular pendiente de corto recorrido, cauce no definido, de actividad erosiva. Las torrenteras pueden ser Permanentes cuando llevan agua todo el año y Estacionales cuando se activan en épocas de precipitaciones y el resto del tiempo permanecen secas. En la ciudad de Lunahuaná se ha identificado 2 torrenteras estacionales conocidas como Torrentera Santa Rosa y Torrentera Jita, ambas ocupan el 10 % de la superficie de la ciudad de Lunahuaná.

*Torrentera Santa Rosa:* nace de la confluencia de dos quebradas a 830 m.s.n.m. Tiene una longitud de 3 km hasta desembocar en el río Cañete con una pendiente de 5° a 2°. Esta torrentera atraviesa la carretera Cañete – Yauyos y su cauce circunda las inmediaciones del Barrio Santa Rosa (a 75 m en dirección oeste del área recreativa) y a la plaza de Armas a una distancia de

1.2 km en dirección oeste, Figura 27. El flujo que desciende por este cauce está conformado por gravas, arenas y finos (limos, arcillas). Históricamente, en el mes de marzo del 2015 descendió un flujo producto de precipitaciones que no causó daños a la infraestructura física (testimonio de pobladores).



Figura 27: Torrentera Santa Rosa en las cercanías del barrio del mismo nombre.

*Torrentera Jita*: se inicia en el anexo de Jita aproximadamente a 1.5 km en dirección oeste de la plaza central de Lunahuaná. Nace de la confluencia de dos quebradas a una altura de 940 m.s.n.m. Tiene una longitud de 6 km con pendiente de 4° a 2° hasta desembocar en el río Cañete. La torrentera pasa por debajo del puente Jita (vial-peatonal), Figura 28. El flujo que desciende por este cauce está conformado de gravas, arenas y finos (limos, arcillas). Se activa en épocas de precipitaciones cuando superan el acumulado mensual de 21.4 mm, el resto del año permanece con cauce seco



Figura 28: Torrentera Jita en proceso de enrocado mediante el uso de gaviones para evitar la erosión de sus márgenes.

## 9.2.- Geología

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

**Geología histórica:** *Se encarga del estudio de los distintos procesos por los que ha pasado el planeta Tierra, desde su origen hasta la actualidad, para ello se creó una división cronológica conocida como “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 San Vicente de Cañete 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 la zona de estudio, y ellas consisten en rocas del Mesozoico Inferior al Cuaternario Reciente, todas conformadas por rocas volcánicas de las cuales se tiene como substrato a la Formación Huaranguillo (Kis-hu), constituida principalmente por calizas intercaladas con lutitas andesíticas, seguida de granodioritas (ks-in/gd) que pertenecen a la Superunidad Incahuasi. Sobreyace a estas rocas, otras de tipo dioritas, tonalitas (Ks- ti/to, di), granodioritas (Ks- ti/to, gd) que pertenecen a la Superunidad Tiabaya,

seguidas de depósitos Cuaternarios conformados por unidades fluviales (Qh-fl), aluviales (Qh-al) y coluviales (Qh-co) compuestos por materiales heterogéneos de gravas redondeadas a sub redondeadas envueltas en una matriz arenosa y/o limosa (Figura 29).


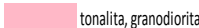
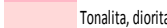

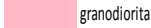
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS		ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Fluvial	Qh-fl	
			Dep. Aluvial	Qh-al	
		Dep. Coluvial	Qh-co		
	Pleistoceno				
	NEOGENO	Mioceno			
	PALEOGENO	Eoceno			
MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior			P-di  Diorita
					Superunidad Tiabaya (80.5 + 1.4 Ma) Ks-ti/to,gb Ks-ti/to,di  tonalita, granodiorita  Tonalita, diorita
	Inferior	Fm. Huaranguillo	Kis-hu		Superunidad Incahuasi Ks-in/gb  granodiorita

Figura 29: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades aflorantes en las inmediaciones de la ciudad de Lunahuaná

### 9.2.2- Geología local

In situ, se procedió con el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Lunahuaná a escala 1:10,000, sobre un área de 10 km<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 30). A continuación se describen las principales características de estas unidades estratigráficas.

**Rocas intrusivas:** Tienen por origen la solidificación de una mezcla fundida llamada magma cuando está dentro de la corteza (Rivera, 2011). Entre las principales unidades se tiene:

**Superunidad Incahuasi granodiorita (Ks-in/gd):** Las rocas que conforman esta Superunidad son parte del Batolito de la Costa; o sea granodioritas que se encuentran meteorizadas e intemperadas, ligeramente oxidadas, rugosas y moderadamente fracturadas. La unidad pertenece al Cretáceo Inferior y aflora en el extremo SO de la ciudad de Lunahuana, Anexo de Jita, Figura 31.

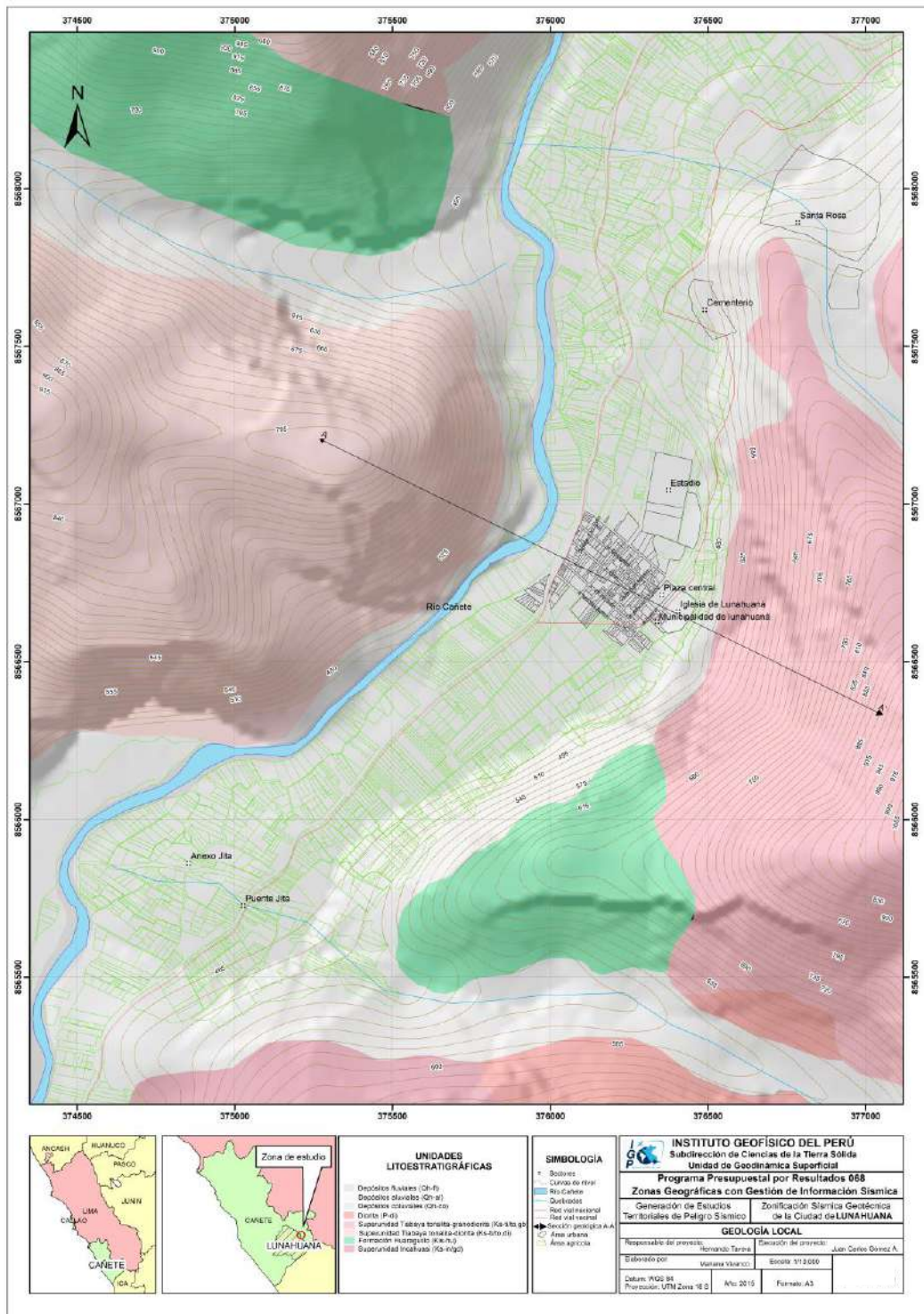


Figura 30: Mapa geológico local de la ciudad de Lunahuaná y alrededores



Figura 31: Granodiorita que aflora en el cerro del Anexo Jita.

**Superunidad Tiabaya:** Las rocas de esta unidad forman parte del batolito de la costa y consisten en una secuencia de rocas intrusivas tonalitas, granodioritas y dioritas que se encuentran meteorizadas, ligeramente oxidadas y moderadamente fracturadas. Esta unidad pertenece al Cretáceo Superior y en la ciudad de Lunahuaná se han identificado las siguientes rocas: Tonalita-diorita (ks-ti/to-di), que constituyen la base del Cretáceo Superior, conformadas por tonalitas grisáceas intercaladas con dioritas. Se encuentran instruyendo a la formación Huaranguillo. Afloran a la margen derecha del río Cañete en dirección norte de la ciudad de Lunahuaná, Figura 32.

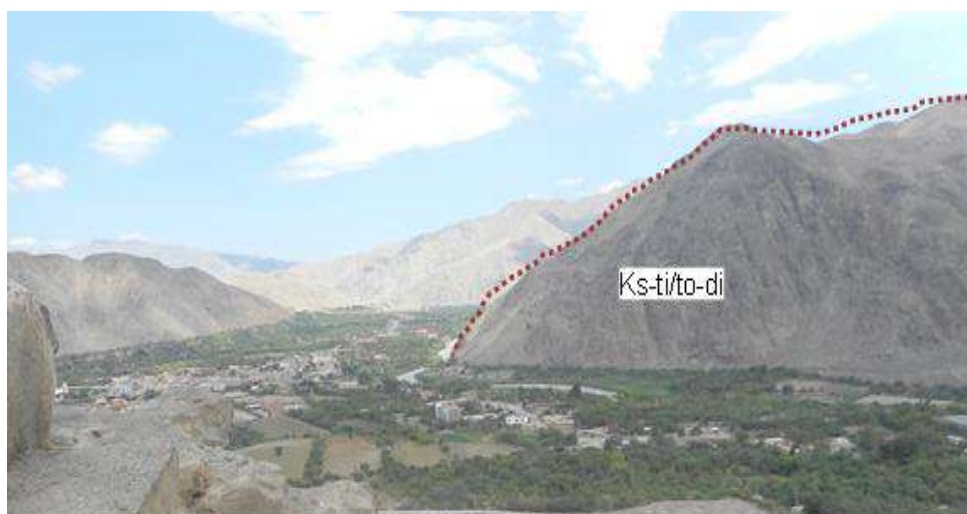


Figura 32: Tonalitas y dioritas (línea marrón) que conforman las montañas ubicadas en el extremo norte de Lunahuaná

**Tonalita-granodiorita (ks-ti/to-gd):** Constituyen las rocas intrusivas más abundantes en la zona de estudio. Están conformadas por tonalitas y granodioritas cuya textura se caracteriza por la presencia aislada de micas en cristales hexagonales y horblendas prismáticas: Estas rocas afloran al margen izquierdo del río Cañete al sureste y suroeste de la ciudad de Lunahuaná, Figura 33.



Figura 33: Tonalita – granodiorita que presenta fracturamiento debido a los agentes de meteorización (lluvia, viento y otros) que afectan a la estructura de la roca.

**Diorita (P-di):** Rocas que intruyen a la Súper Unidad Tiabaya e Incahuasi. Está constituida por rocas tipo dioritas que en la ciudad de Lunahuaná afloran en ambas márgenes de la Quebrada Jita, Figura 34.

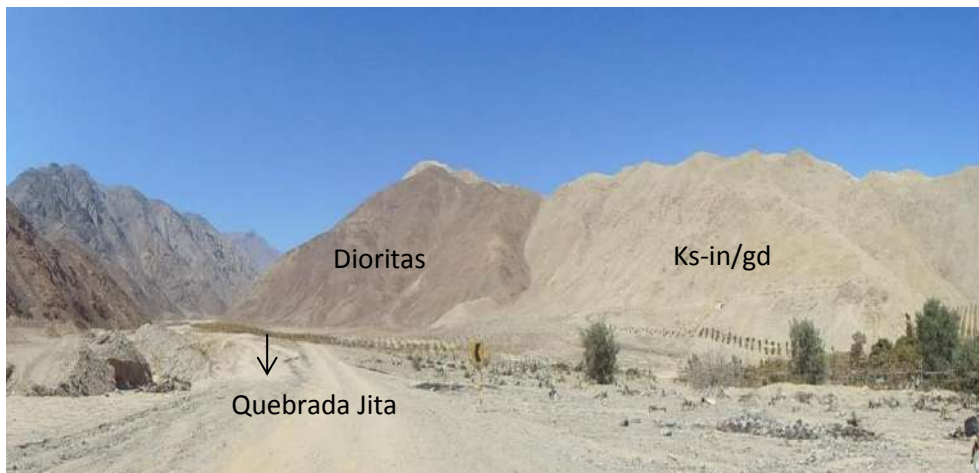


Figura 34: Contacto de roca dioritas con granodiorita de la Súper Unidad Incahuasi.

**Formación Huaranguillo (Ksi-hu):** Secuencia volcánica-sedimentaria conformada por calizas grises intercalados con lutitas andesíticas y diques porfiríticos, cuyos afloramientos se orienta en dirección noroeste – sureste. En la ciudad de Lunahuaná, este tipo de rocas afloran a 850 m del centro urbano así como en la quebrada Juan Croso, Figura 35.

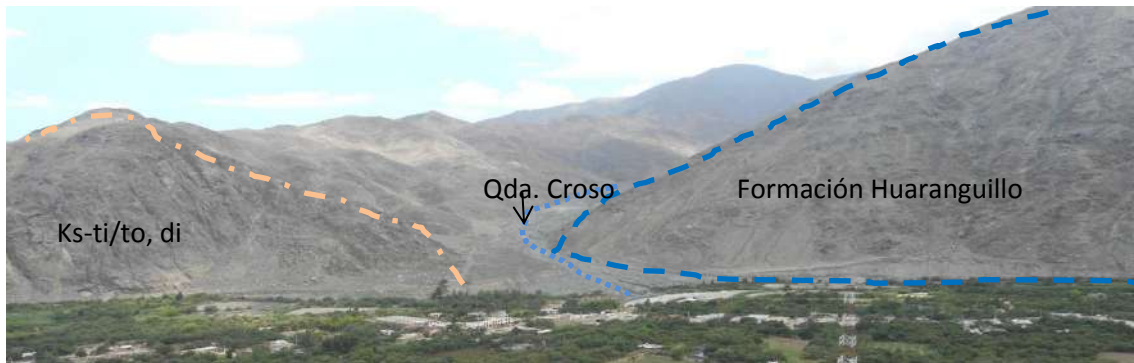


Figura 35: Formación Huaranguillo aflora al margen izquierdo de la Quebrada Croso, ubicada al nor este de la ciudad de Lunahuaná.

**Depósitos cuaternarios:** Estos depósitos se encuentran suprayacendo al substrato rocoso, conforma por areniscas de la Fm. Paracas. Se encuentran distribuidos de manera dispersa y con variados espesores. Estos depósitos de la edad Holocena, son principalmente de origen aluvial.

**Depósitos fluviales (Qh-fl):** Constituidos por gravas redondeadas bien gradadas, en matriz arenosa o areno-limosa y en menor proporción arcilla, dispuestos en forma ordenada y de grano creciente. En la ciudad de Lunahuaná, se han identificado estos depósitos en ambos márgenes del río Cañete, conformados por bloques, gravas y arenas, Figura 36.

**Depósitos aluviales (Qh-al):** Estos tipos de depósitos sobreyacen a la Formación Huaranguillo, y se presentan formando la terraza donde se asienta la ciudad de Lunahuana y terrenos de sembrío. Están constituidos por una mezcla de cantos rodados y gravas de litología heterogénea con predominancia de intrusivos, tienen forma redondeada a sub redondeada con matriz arenosa-limosa de consistencia suelta a medianamente densa. Estos depósitos son acarreados por las Quebradas Jita y Juan Croso. En algunos niveles se observa la presencia de grandes bloques caóticamente dispuestos y relacionados a procesos aluvionales, Figura 37.



Figura 36: Depósitos fluviales conformado por bloques redondeados a sub redondeados cuyos diámetros alcanzan 20".

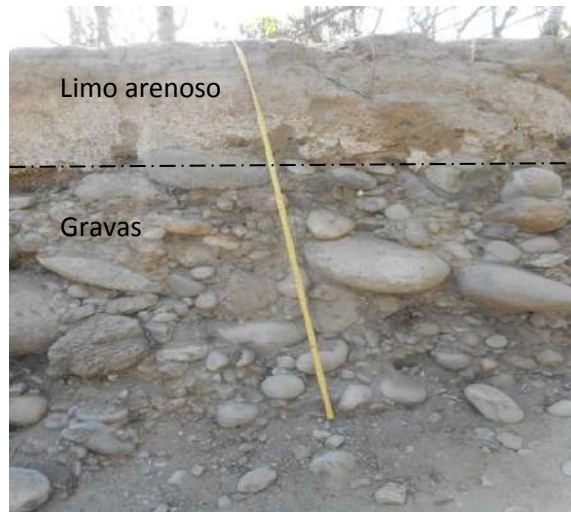


Figura 37: Depósitos aluviales conformados por limos y gravas con matriz areno limosa de forma sub redondeada a redondeada ubicados al este y oeste de la ciudad de Lunahuaná, sobre este tipo de materiales se asienta el 70 % de la ciudad en mención.

**Depósitos coluviales (Qh-co):** Consisten en clastos angulosos con dimensiones que fluctúan entre bloques a gravas de consistencia suelta, acumulándose y/o depositándose al pie de las laderas o también pueden permanecer superpuestos sobre la superficie de roca original. En la ciudad de Lunahuaná, se identificó este tipo de depósitos en las laderas de las montañas, ubicadas a 900 m del centro de la ciudad de Lunahuaná. Estos están conformados por escombros de gravas y bloques angulosos a sub angulosos en matriz limo arenoso de litología intrusiva, Figura 38.



Figura 38: Depósitos coluviales conformados por gravas angulosas de diámetro 7" a 1".

### 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. Además, la presencia de El Niño, junto a otros factores relacionados con la actividad antrópica originan las inundaciones.*

Los eventos geodinámicos predominantes en la ciudad de Lunahuana son los movimientos de masa del tipo caída de rocas e inundaciones (Figura 39) y sus características son:

### **9.3.1.- Movimientos en masa (MM)**

Son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de rocas, detritos o tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Para la descripción de los MM se ha tomado en cuenta la Clasificación de Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968, 1988), la cual se basa en dos elementos: el tipo de movimiento y el material. En cuanto al primero se consideran cinco clases: caída, volcamiento, deslizamiento, flujo y propagación lateral; mientras que, en el segundo se tienen: rocas y suelos (divididos en detritos y tierras). En la ciudad de Lunahuana se ha determinado 3 eventos: flujo de detritos, caídas de rocas e inundaciones.

***Flujo de detritos:*** *Es un tipo de MM durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido ya que su contenido de sedimentos controla el tipo de flujos que predomina sobre la fase granular. Se caracterizan por ser rápidos a extremadamente rápidos dependiendo de la topografía por la cual se desplacen. En la ciudad de Lunahuaná, los flujos discurren a lo largo de las torrenteras Santa rosa y Jita, estando conformados por gravas, clastos y bloques angulosos mal gradados con tamaños de hasta 60" de diámetro promedio, los cuales son transportados en suspensión por una matriz areno limosa, Figura 40.*

*Asimismo, los flujos de detritos ocurren en la margen derecha e izquierda del río Cañete dentro del área de estudio. Por ejemplo, en marzo del 2015 descendió un flujo por la torrentera Santa Rosa producto de las precipitaciones, pero que no afectó la infraestructura física de la ciudad de Lunahuana.*

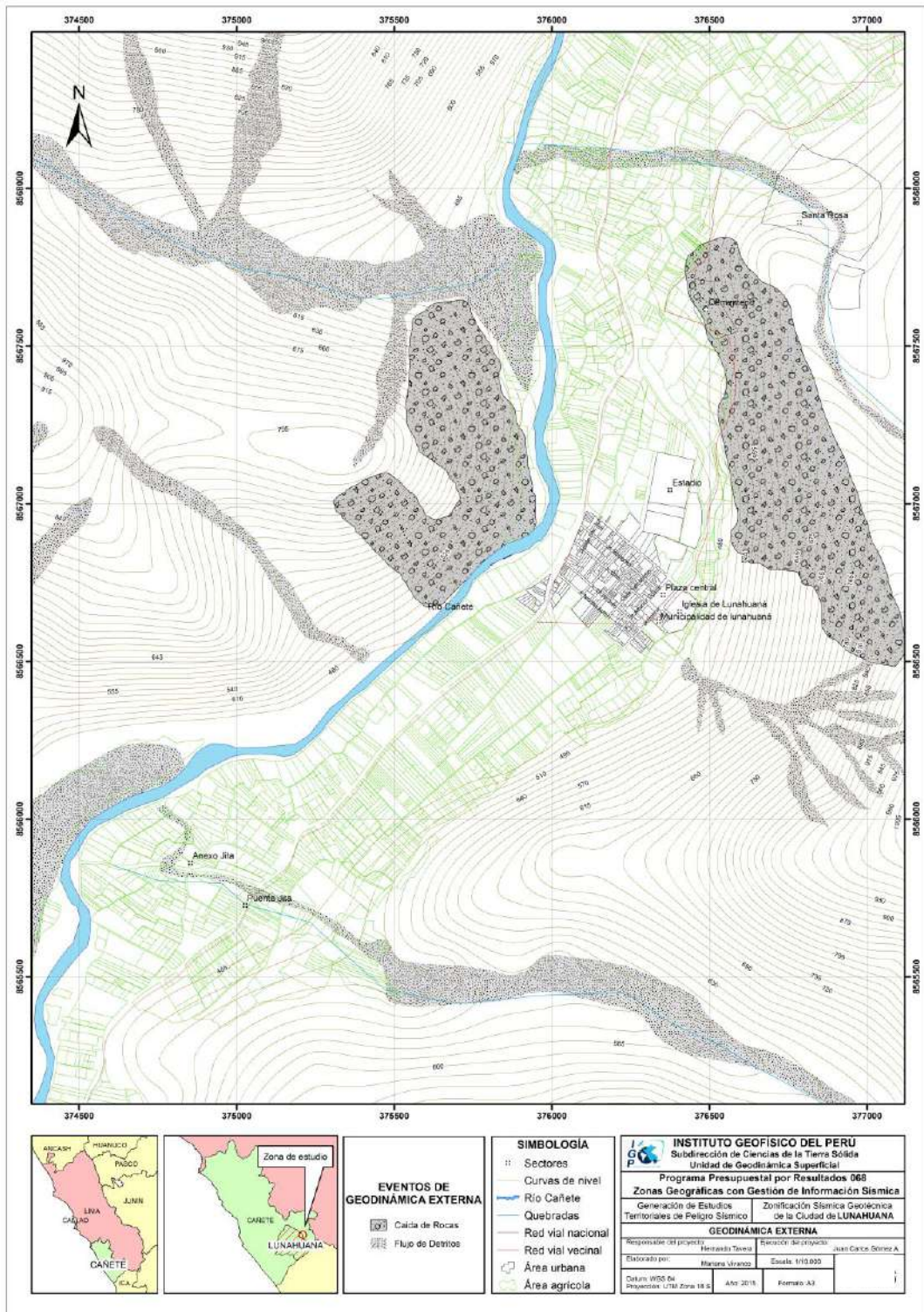


Figura 39: Mapa geodinámico local para la ciudad de Lunahuana y alrededores



Figura 40: Zona potencial para la ocurrencia de flujo de detritos ubicada a 450 m en dirección Sur-Oeste del Jirón Bolívar. Áreas críticas, Jirón Bolívar 28 de Julio.

**Caídas de rocas: Caída de rocas:** En este tipo de eventos, los clastos o fragmentos de rocas pre existentes se desprenden de una ladera como resultado de los procesos de erosión y meteorización, ya sea de origen natural o antrópico. En la ciudad de Lunahuaná, la caída de rocas ocurre tanto al margen derecho e izquierdo del río Cañete sobre las laderas de los cerros que presentan pendientes mayores a  $40^\circ$ . Asimismo, estos eventos se presentan en las laderas y en las partes bajas de los cerros ubicados al margen derecho de la carretera asfaltada, próximo a la Av. Cementerio. La caída de rocas se produce aproximadamente a 550 m en dirección este, desde la plaza Central de la ciudad de Lunahuana, y en donde se identificaron bloques caídos de 1m de diámetro en promedio. La caída de estos bloques obstaculiza parcialmente el tránsito vehicular en la zona (Figura 41).

### 9.3.2.- Inundaciones

Las inundaciones fluviales son causadas por el desbordamiento de los ríos y arroyos debido al aumento brusco del volumen de agua, denominado crecida a consecuencia del exceso de lluvias. (CENEPRED, 2013). En general, cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (en más del 50%) en una zona, se denominan lluvias extraordinarias o tormenta extrema que pueden generar inundaciones en las áreas circundantes al río. Esta anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico extremo.



*Figura 41: Caída de rocas provenientes de la ladera, de los cerros y que interrumpe el paso de los vehículos en la carretera de Cañete-Yauyos.*

Para estimar las áreas probables a inundarse (Figura 42), es necesario conocer la variación temporal del agua (altura en mm) que cae durante una tormenta extrema en la cuenca estudiada. Este registro de lluvia (lluvia total) es representado a través de un histograma; es decir, la representación de la variación de altura de precipitación en intervalos de tiempo. Con estos datos se establece una curva de tendencia de los datos registrados a fin de pronosticar una magnitud de precipitación para cierto período de retorno. A este resultado se le resta el agua que se infiltra en el suelo. Estos datos son obtenidos en campo calculando la cantidad de agua que ingresa al suelo en un determinado tiempo (capacidad de infiltración del suelo) y como resultado se tiene el hietograma de la lluvia neta; es decir, el agua (mm) que escurrirá sobre el suelo.

Este hietograma de lluvia neta es transformado a un hidrograma de representación del caudal como resultado de la caída de agua (escorrentía) a través del tiempo mediante un gráfico de dispersión. Esto se logra utilizando un modelo del sistema hidrológico; es decir, una aproximación al sistema real a través de leyes físicas que representan los procesos hidrológicos y en este caso, la transformación de lluvia a escorrentía (hietograma a hidrograma). Esta transformación es ingresada a un modelo numérico hidráulico computacional para simular el escenario de un evento hidrometeorológico extremo con el cual se conocerán las áreas inundables.

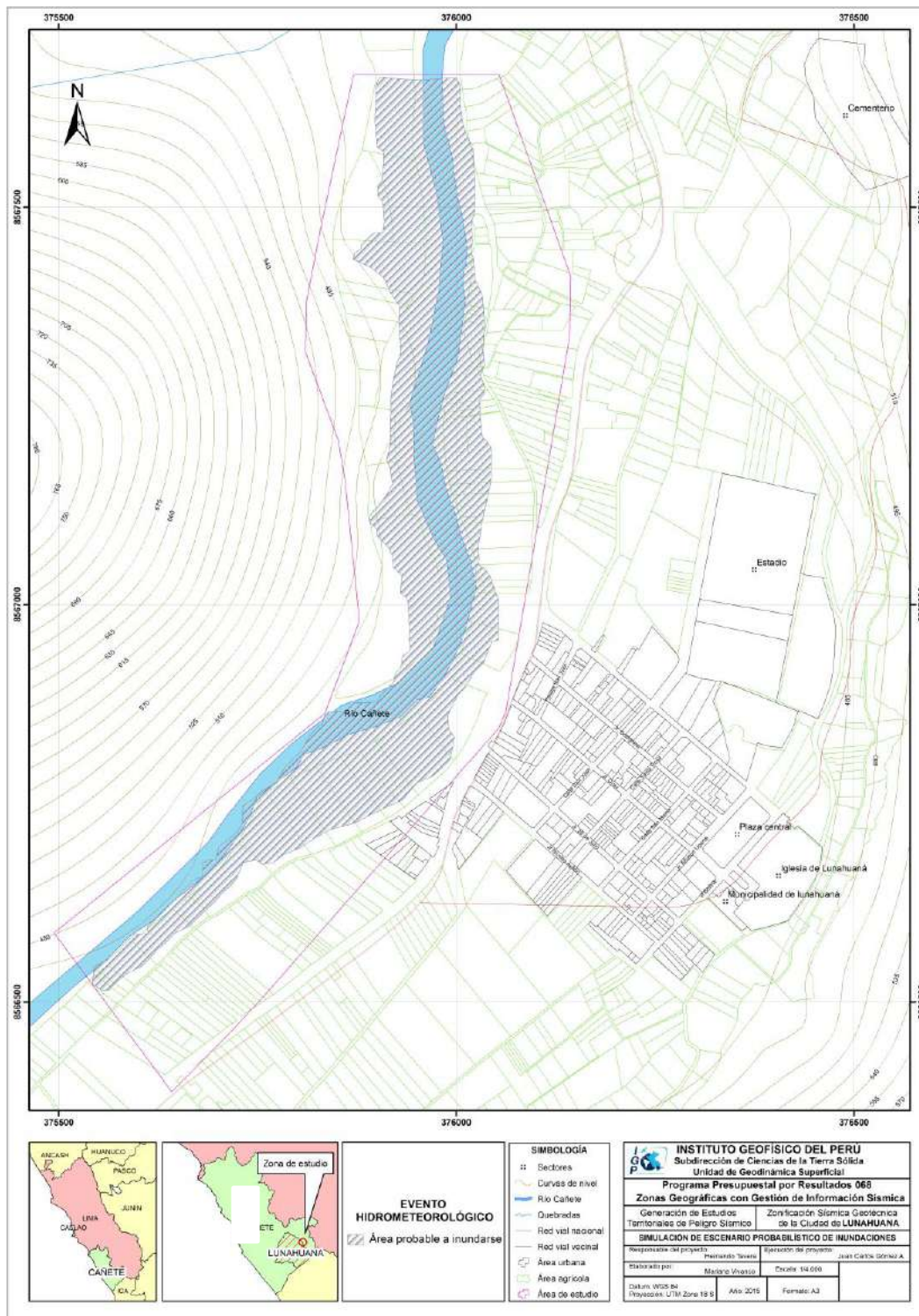


Figura 42: Mapa de simulación de escenario probabilístico de inundaciones en la ciudad de Lunahuaná y alrededores

Para la simulación de los eventos hidrometeorológicos, la estimación de áreas inundables y la obtención del umbral de inundación del río Cañete, es necesario utilizar un modelo numérico hidráulico computacional. Para este caso se utilizó el programa FLO-2D debido a que permite realizar la simulación de tránsito de avenidas en dos dimensiones; simula flujo en canales (abiertos y cerrados), superficies no confinadas y flujo en calles. Asimismo, las características físicas del flujo pueden ser modificadas, como en la reología (viscosidad, esfuerzo cortante), concentración de sedimentos, composición de sedimentos finos (granulometría del sedimento), etc. Este modelo está validado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); El Cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), Distrito de Sacramento; El Distrito de Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix, Arizona; y otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres.

**Datos de entrada del modelo:** Los datos de ingreso al programa es la topografía del área de estudio, el coeficiente de rugosidad del cauce del río y de las áreas circundantes (Número de Manning,  $n$ ). Con la información topográfica y sus características físicas estimadas  $n$ , se procede con ingresar el hidrograma del evento que se desea simular, se realiza la simulación y se extrae la información de las alturas máximas alcanzadas del flujo para identificar la intensidad del evento. Con los resultados del modelamiento numérico hidráulico computacional para la ocurrencia de un evento hidrometeorológico, se generan mapas de peligro que ayudarán a visualizar las potenciales áreas a inundarse. En la Figura 43, se presenta el esquema del programa FLO-2D.

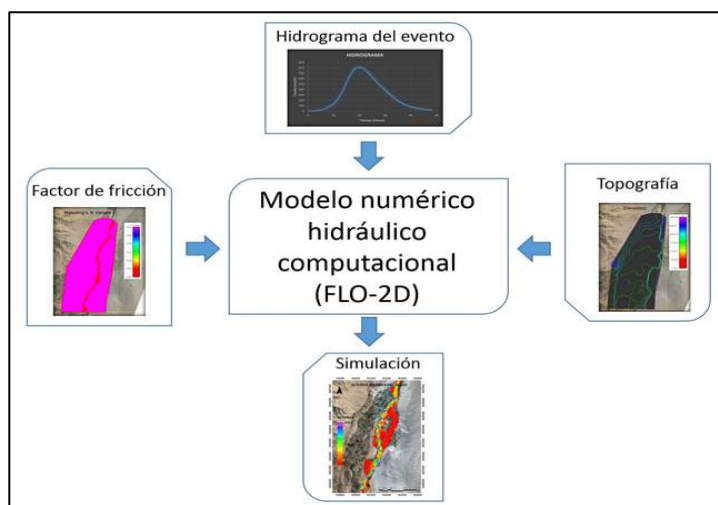


Figura 43: Esquema de datos de entrada al programa FLO-2D

**Topografía:** Para este estudio se utilizó la información digital obtenida mediante el levantamiento batimétrico con una estación total en la ciudad de Lunahuaná. Esta información contiene 8 perfiles transversales del río Cañete en un tramo de 4 kilómetros; es decir, entre 2.5 kilómetros aguas abajo de la Municipalidad y 1.5 kilómetros aguas arriba de la misma. Esta información batimétrica se complementó con la base topográfica para luego ser ingresada al programa. En la Figura 44 se presenta un sector del modelo digital del terreno (MDT) utilizado en la simulación de los eventos hidrometeorológicos.

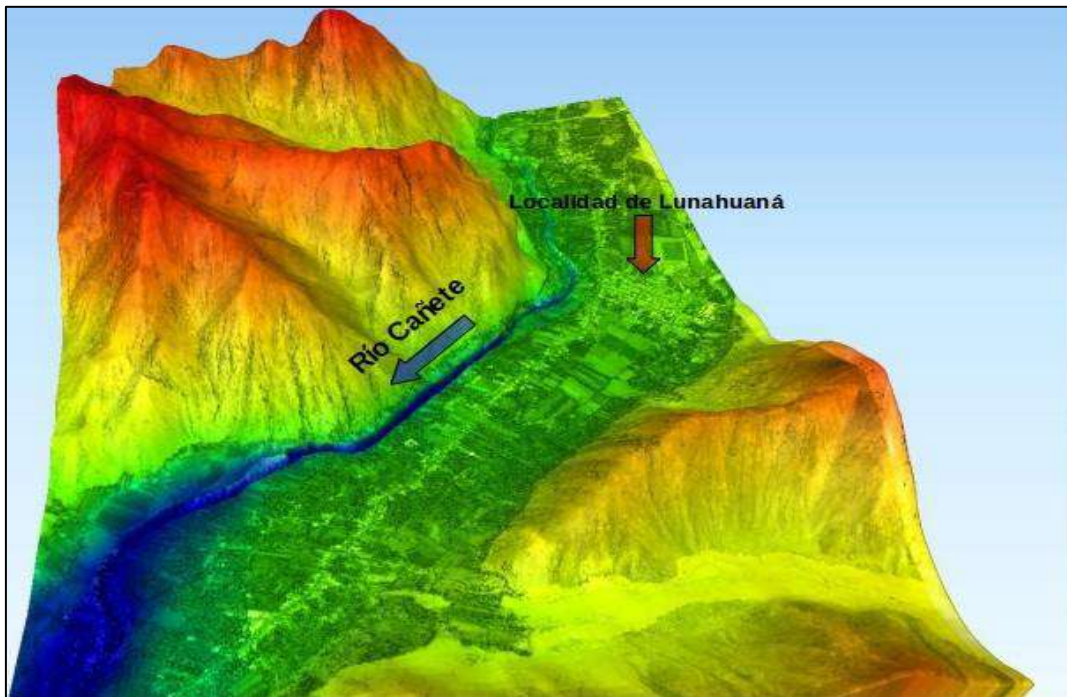


Figura 44: Modelo digital del área de estudio para el cálculo de peligro por inundación.

El MDT generado fue ingresado al programa FLO-2D para realizar una malla de 10 metros de resolución a fin de cubrir el ancho del río Cañete y para poder observar la dinámica del flujo (comportamiento del agua). En la Figura 45, se observa la malla generada y se entiende que por cada  $100 \text{ m}^2$  del terreno, existe un dato de elevación que representa la su topografía real. En la Figura 46 se muestra una ampliación del mallado en la que se puede apreciar la dimensión de cada cuadrado, en comparación con el área del terreno en estudio.

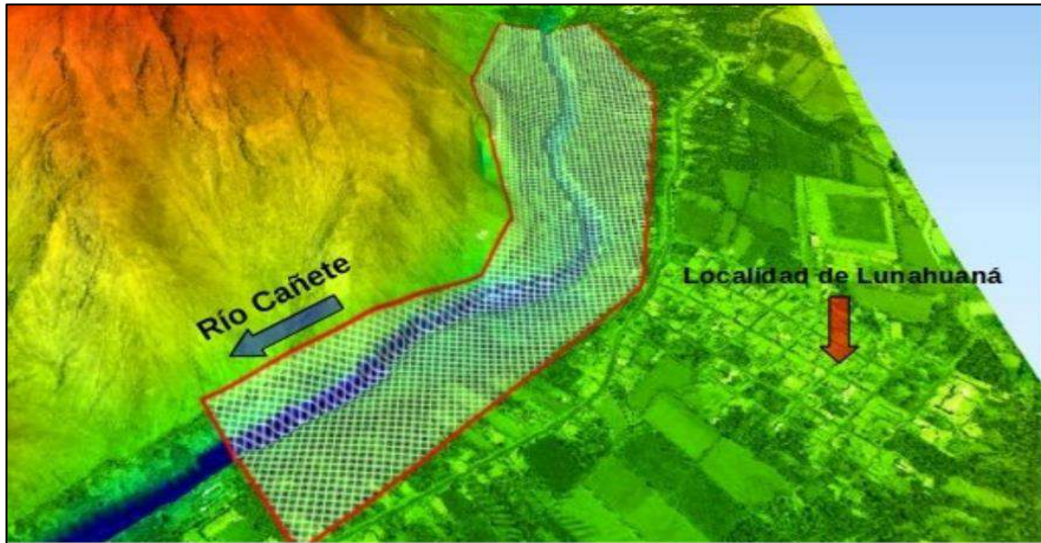


Figura 45: Malla de datos de elevación sobre el área de estudio.



Figura 46: Vista ampliada de la malla construida para el área de estudio

**Factor de fricción:** El movimiento del fluido en un canal se ve afectado por la fuerza de gravedad, como el factor más importante, y la resistencia en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza turbulenta del flujo. El flujo en un canal natural se aloja dentro de lo que se llama cauce y generalmente, su perfil longitudinal es sinuoso e irregular con formas y dimensiones que varían continuamente a lo largo del mismo. Por otro lado, el flujo en un río arrastra material sólido (material en suspensión, arena, grava e incluso grandes bloques) que modifica continuamente la forma, dimensiones de la sección y perfil del cauce e impide una definición precisa de su rugosidad.

Sin embargo, esta rugosidad puede expresarse en términos numéricos mediante ensayos empíricos, de los cuales el más utilizado por su metodología es el coeficiente de Manning.

La ecuación de fricción de Manning ( $n$ ), es de carácter empírico y depende solo de la rugosidad de la frontera; por lo tanto, es independiente del número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas). En general, su aplicación se restringe a flujos turbulentos en canales rugosos. Además,  $n$  es propiamente un factor de fricción, es decir, depende también de la geometría de la sección y características hidráulicas del flujo. En la práctica  $n$  es función de diferentes variables, y la estimación de un valor adecuado precisa del conocimiento cualitativo y cuidadoso de los factores que más influyen.

La rugosidad del canal proporciona un punto crítico de partida en la selección de  $n$  cuando se realizan estudios de canales naturales para distintos fines. Por ejemplo, pueden obtenerse fotografías de campo en partes estratégicas para compararlas con las de canales de resistencia conocida, junto con un resumen de los parámetros geométricos e hidráulicos que permitan una definición más adecuada de las condiciones del flujo. Estos valores se pueden observar en las tablas propuestas por Ven Te Chow (1994), útiles para la selección del factor de fricción “ $n$ ”.

**Selección del valor del número de MANNING:** Para la selección del valor del número de Manning en el cauce del río Cañete y de las áreas aledañas, se utilizó el método de técnicas de campo en superficie de agua propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning propuesta por Ven Te Chow (1994). Como resultado, el valor del número de Manning para el cauce del río Cañete es de 0.043 y para las áreas aledañas de 0.07, esto quiere decir que el cauce del río Cañete ejerce menor fuerza de oposición al movimiento del flujo que las áreas aledañas, Figura 47.

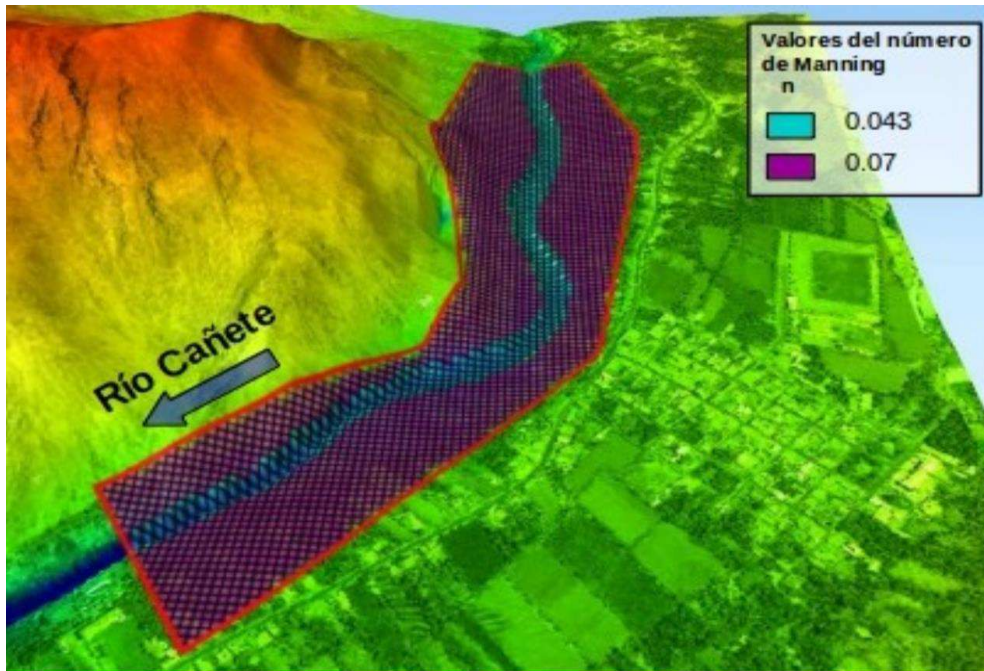


Figura 47: Valores del número de MANNING para el río Cañete e inmediaciones

**Hidrograma de los eventos hidrometeorológicos:** Para el cálculo de los hidrogramas simulados, la metodología varió de acuerdo al tipo de evento hidrometeorológico, tal como se describe a continuación:

**Evento hidrometeorológico extremo:** En general, en nuestro país no se cuenta con datos hidrométricos y pluviométricos, además la mayor parte de las cuencas hidrográficas no se encuentran instrumentadas, es por ello que se utilizan métodos indirectos para la estimación de caudales y tormentas de diseño. Como dato básico se utiliza las precipitaciones máximas de 24 horas para los años registrados (multianuales), las cuales pasan por un análisis de frecuencias que son validadas a través de una prueba de bondad de ajuste; es decir, se determina la correlación de la curva generada y los datos reales se ajustan al nivel mínimo de significancia (correlación menor a 0.05) para las distintas distribuciones probabilísticas.

Determinada la distribución probabilística que más se ajusta al registro de los datos, se pronostica la precipitación (mm) para un determinado período de retorno y luego, se procede a realizar el diseño de la tormenta por medio del método de tormentas hipotéticas (US-SCS, 1986). En este caso, se considera la distribución del Tipo I, debido a que el método presenta

semejanza con el medio geográfico y con el clima marítimo del Pacífico, o sea inviernos húmedos y veranos secos.

Finalmente, se obtiene como resultado el hietograma de la tormenta de diseño, al cual se le restará el agua infiltrada estimada con el método de Número de curva del SCS (1972). Este nuevo hietograma, será transformado a un hidrograma a través del modelo de Hidrograma sintético unitario del SCS (1972). Este modelo es uno de los más usados, debido a que el hidrograma generado es similar al que puede esperarse en una cuenca real. En la Figura 48, se presenta un esquema que resume la metodología aplicada para el cálculo del hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

Para el modelamiento hidrometeorológico de un evento extremo es necesario conocer los parámetros de la cuenca (área, cota máxima, cota mínima, longitud del curso principal, tiempo de concentración y tiempo de retardo) a partir del punto en donde comenzará el modelamiento. Para la cuenca del río Cañete se consideró como punto de descarga el definido por las siguientes coordenadas UTM: 375948.456, 8568220.984. A partir de esta nueva delimitación, se obtuvo los parámetros, presentados en la Tabla 1.

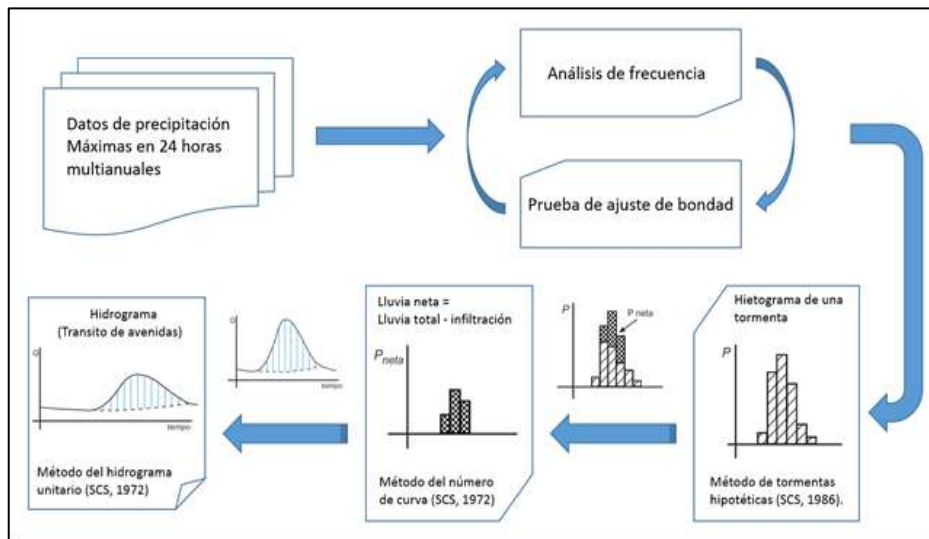


Figura 48: Hidrograma del evento hidrometeorológico extremo en el río Cañete

Tabla 1: Parámetros de la cuenca del río Cañete delimitada

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
<b>SUPERFICIE</b>		
ÁREA	Km.2	5566.79
<b>COTAS</b>		
COTA MÁXIMA	msnm.	5831.85
COTA MÍNIMA	msnm.	474.26
<b>RED HÍDRICA</b>		
LONGITUD DEL CURSO PRINCIPAL	metros	198523.00
<b>PARÁMETROS GENERADOS</b>		
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN ( $T_c$ )	minutos	940.49
TIEMPO DE RETARDO ( $T_{lag}$ )	minutos	564.29

Para estimar el tiempo de concentración se utilizó la ecuación de Kirpich (California Culverts Practice, 1942), siendo estimado en 940.49 minutos. Este corresponde al tiempo que demora en recorrer una gota de agua, desde el punto más alejado de la cuenca hacia el punto de descarga. El tiempo de retardo o de desfase entre la precipitación máxima de la tormenta y el caudal máximo que se genera por dicha precipitación, fue calculado en 564.29 minutos.

Con los parámetros calculados y considerando la nueva delimitación de la cuenca del río Cañete (Figura 49), se procedió a calcular el hidrograma del evento extremo. Para ello también se ha considerado que un evento hidrometeorológico de máximas avenidas requiere un caudal de  $653.98 \text{ m}^3/\text{s}$  para un periodo de retorno de 100 años; es decir, que hay una probabilidad del 1% para que este caudal no pueda ser excedido. Este valor fue obtenido mediante el análisis de frecuencia basado en datos de registros de caudales máximos multianuales de la estación hidrométrica Socsi, el mismo que fue validado con la prueba de bondad de ajuste considerando la distribución probabilística de Gumbel.

Para el cálculo del hietograma de tormenta, se partió de un dato de precipitación al azar y el cual se transforma a un hietograma con el método de tormentas hipotéticas del SCS, y luego es convertido a un hidrograma utilizando el método del Hidrograma Unitario del SCS y en el cual se puede obtener el caudal pico del hidrograma. Este caudal pico deberá ser aproximadamente igual al caudal que se desea simular, Figura 50.

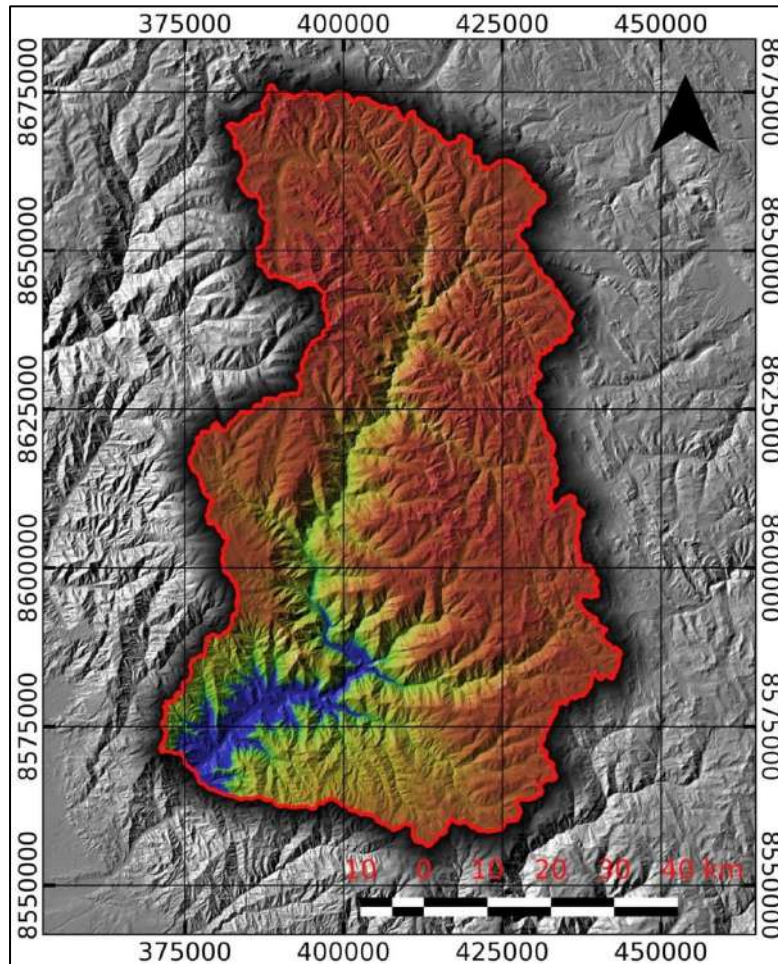


Figura 49: Cuenca del río Cañete

Para la facilidad de los cálculos se utilizó el software Hec-Hms 4.0 el cual contiene los modelos descritos anteriormente. En este caso se obtuvo que un caudal de  $653.9 \text{ m}^3/\text{s}$  es generado por una tormenta en un área de  $5566.79 \text{ Km}^2$ , con una duración de 24 horas y una precipitación máxima de  $7.231 \text{ mm}$ .

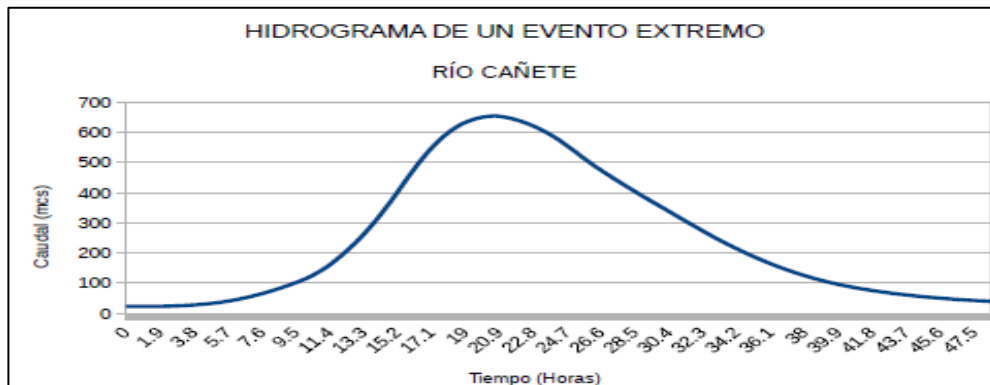


Figura 50: Hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo en el río Cañete.

**Umbral de inundación:** El cálculo del hidrograma del umbral de inundación; es decir, el caudal máximo que puede fluir en el cauce del río Cañete antes de que ocurra un desbordamiento y provoque una inundación. En este caso se realizó simulaciones del flujo permanente (caudales constantes) menor al máximo calculado para el evento extremo, hasta llegar al mínimo caudal que produzca desbordamiento. En este caso el umbral de inundación calculado fue de 240 m<sup>3</sup>/s.

**Caudales históricos:** La generación de los hidrogramas con caudales históricos y estimados, se realizaron con flujo permanente (caudal constante), los mismos que fueron ingresados al modelo y simulados posteriormente. Las simulaciones de caudales históricos fueron de 550 m<sup>3</sup>/s registrados en 1994 por la estación hidrométrica Socsi y de 193 m<sup>3</sup>/s registrado en el años 2013 y corresponde cuando el río Cañete presentó una anomalía del 53%.

**Resultados de los Modelamientos:** Los hidrogramas generados fueron clasificados en diversos escenarios. Escenario I, para el evento hidrometeorológico extremo; Escenario II para el umbral de inundación y Escenarios III y IV, para los caudales históricos.

**Escenario I:** Simulación de un evento hidrometeorológico extremo con un caudal de 653.9 m<sup>3</sup>/s generado por una tormenta de 24 horas de duración. Se considera una precipitación máxima de 7.231 mm y un tiempo de simulación de 48 horas con una malla con resolución de 10 metros. En la Figura 51, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo, las mismas que llegan a inundar mayormente terrenos de cultivo.

Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel se observa que este inunda los campos recreacionales y las zonas de cultivo aledañas que se ubican al lado izquierdo de la carretera. El flujo llega alcanzar alturas de hasta 30.58 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas inundadas, las alturas del flujo llegan hasta 6.12 metros, tal como se puede observar en la Figura 52.

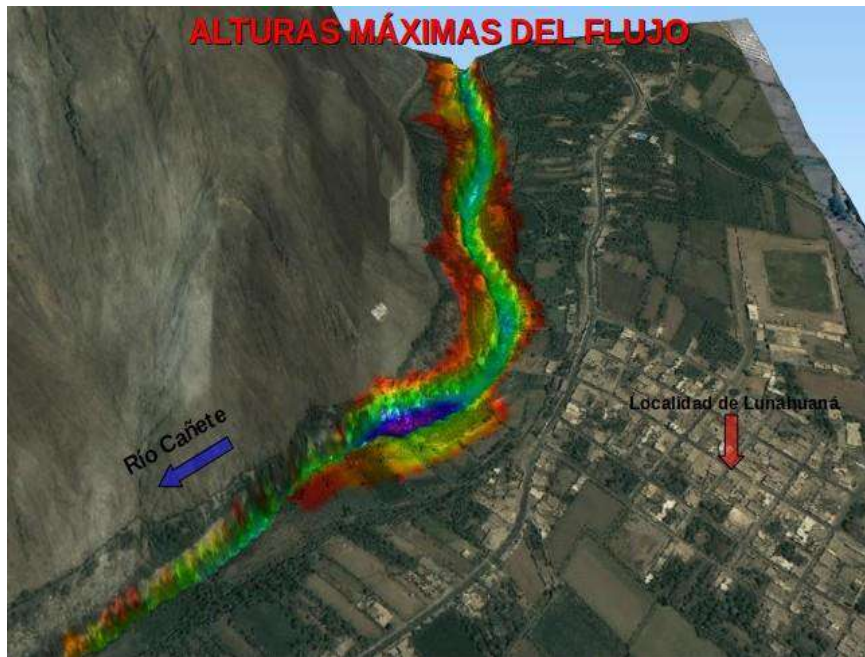


Figura 51: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo.

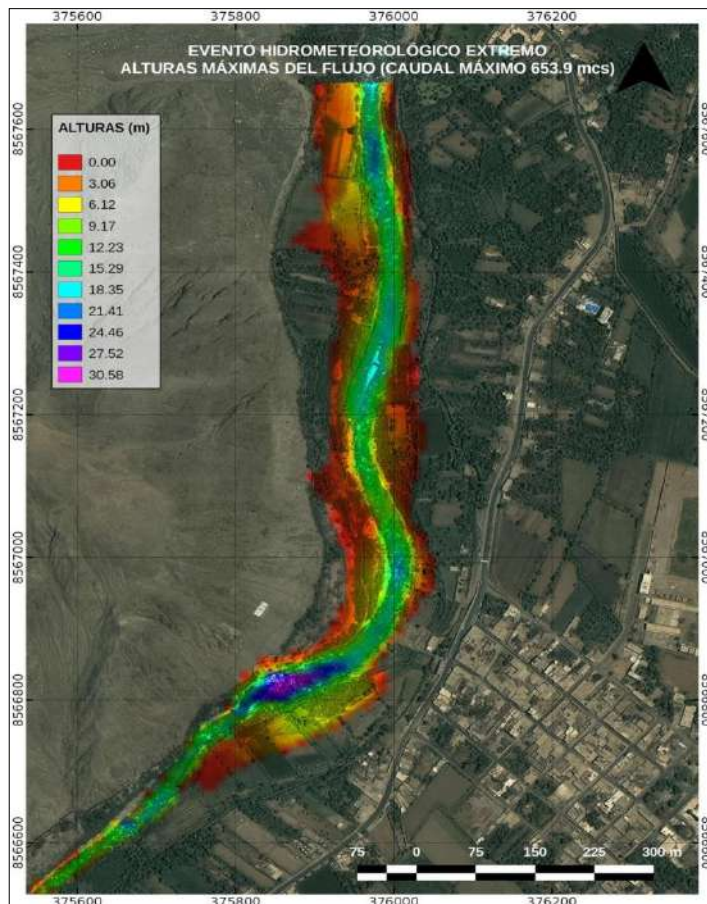


Figura 52: Vista en planta de las alturas máximas del flujo del evento hidrometeorológico extremo.

**Escenario II:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal de  $240 \text{ m}^3/\text{s}$  (umbral de inundación), tiempo de simulación de 10 horas con una malla con resolución de 10 metros. Se procedió a realizar diversas pruebas considerando diferentes caudales, llegándose a observar que para medidas cercanas a  $240 \text{ m}^3/\text{s}$ , el flujo comienza a desbordarse de su cauce, el cual es un indicador para el reconocimiento del umbral de inundación. Durante el desarrollo de la simulación con el caudal de umbral de inundación, el flujo comienza a desbordarse aguas arriba en el inicio de la simulación, y aguas abajo cerca de las zonas recreativas, Figura 53.



Figura 53: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación.

El flujo llega a alcanzar alturas de hasta 19.47 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas, las alturas del flujo llegan hasta 1.95 metros, tal como se puede observar en la Figura 54.

**Escenario III:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal histórico de  $550 \text{ m}^3/\text{s}$  en el año 1994, tiempo de simulación de 10 horas con una malla de 10 metros de resolución. En la Figura 55, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico ocurrido en 1994, en la cual se aprecia que las áreas inundadas son similares a las del evento hidrometeorológico extremo simulado, pero en menor proporción, inundando 3.59 hectáreas en el margen derecho y 2.10 hectáreas en el margen izquierdo. Es importante resaltar que el caudal

histórico registrado fue antes del funcionamiento de la central hidroeléctrica El Platanal.

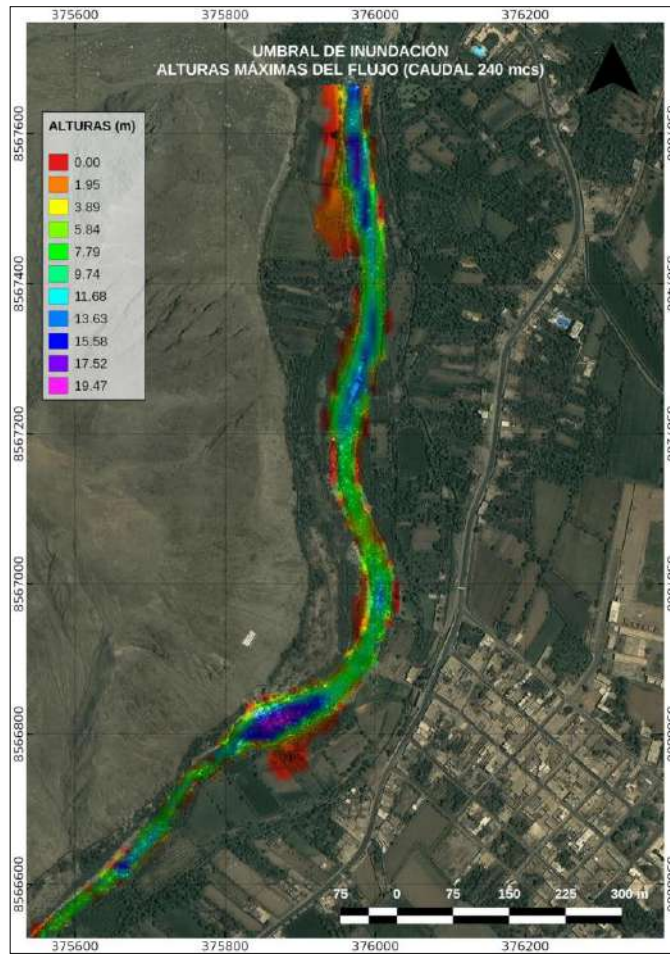


Figura 54: Vista en planta de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación

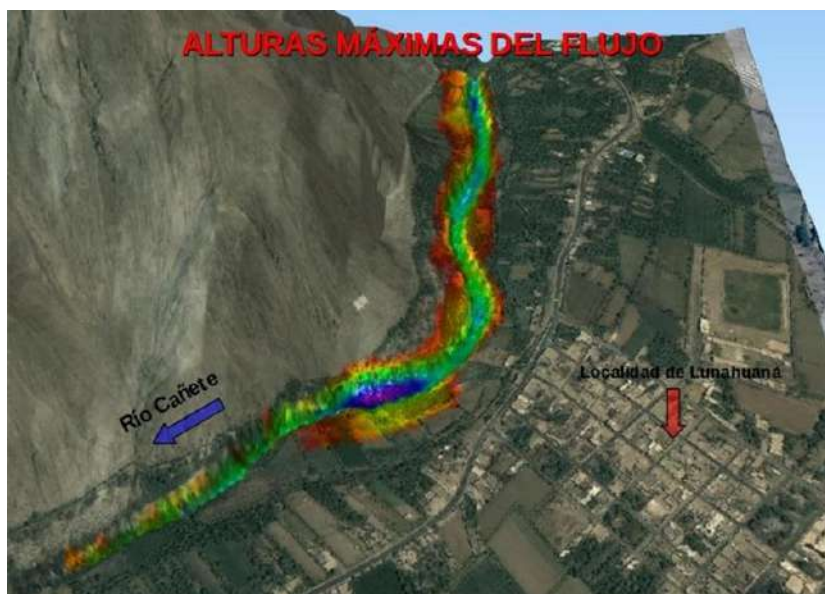


Figura 55: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico histórico de 550m<sup>3</sup>/seg.

El flujo llega alcanzar alturas de hasta 28.73 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas, las alturas del flujo llegan hasta 5.75 metros, tal como se puede observar en la Figura 56.

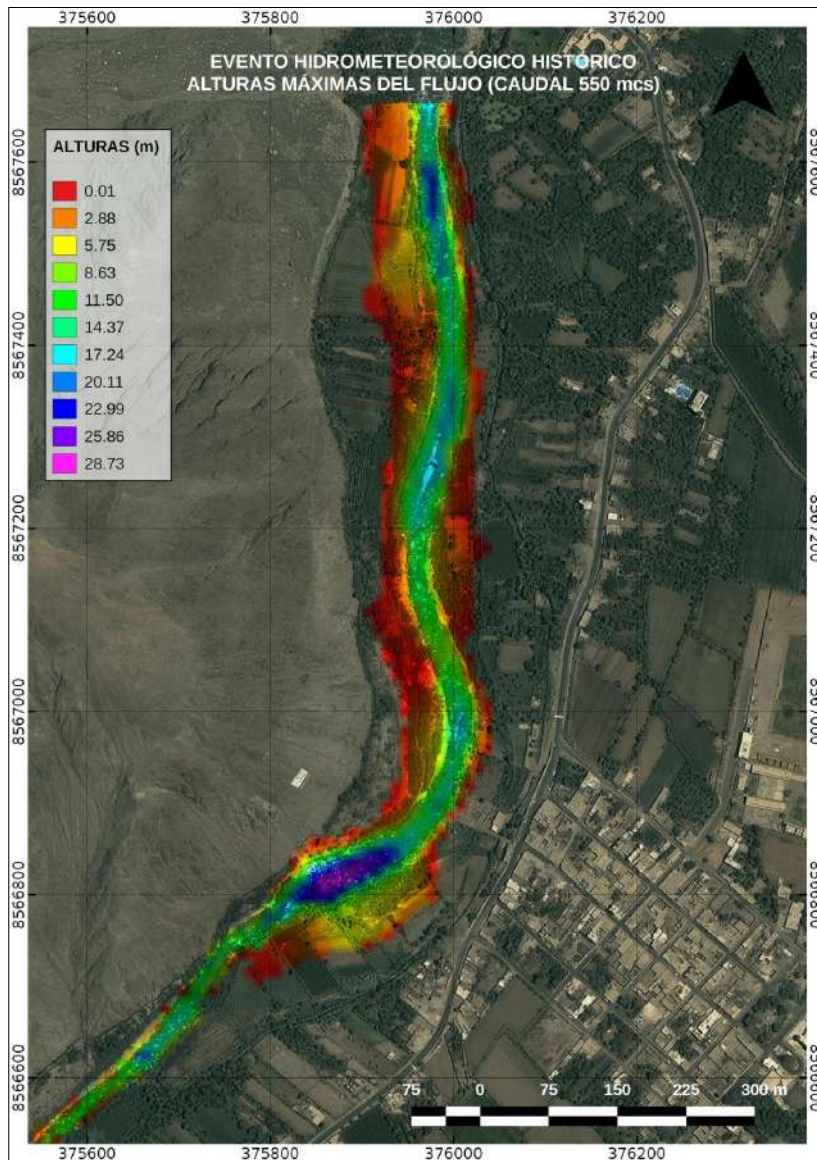


Figura 56: Vista en planta de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico histórico de  $550 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Escenario IV:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal histórico de  $193 \text{ m}^3/\text{s}$  en el año 2013, tiempo de simulación de 10 horas con una malla con resolución de 10 metros. En la Figura 57, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico ocurrido en el 2013 y en este caso, la inundación es una área de cultivo pequeña en donde se inició la simulación.



Figura 57: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico histórico de  $193 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

*Este caudal histórico con una anomalía del 53%, se produce después del funcionamiento de la central hidroeléctrica El Platanal, siendo este menor en comparación con el anterior caudal histórico ocurrido antes del funcionamiento de la Hidroeléctrica, la diferencia es del orden de  $357 \text{ m}^3/\text{s}$ .*

*El flujo llega alcanzar alturas de hasta 17.48 metros (medidos desde el fondo del río) y en las zonas inundadas, de hasta 1.35 metros, llegando a inundar 0.54 hectáreas, tal como se puede observar en la Figura 58.*

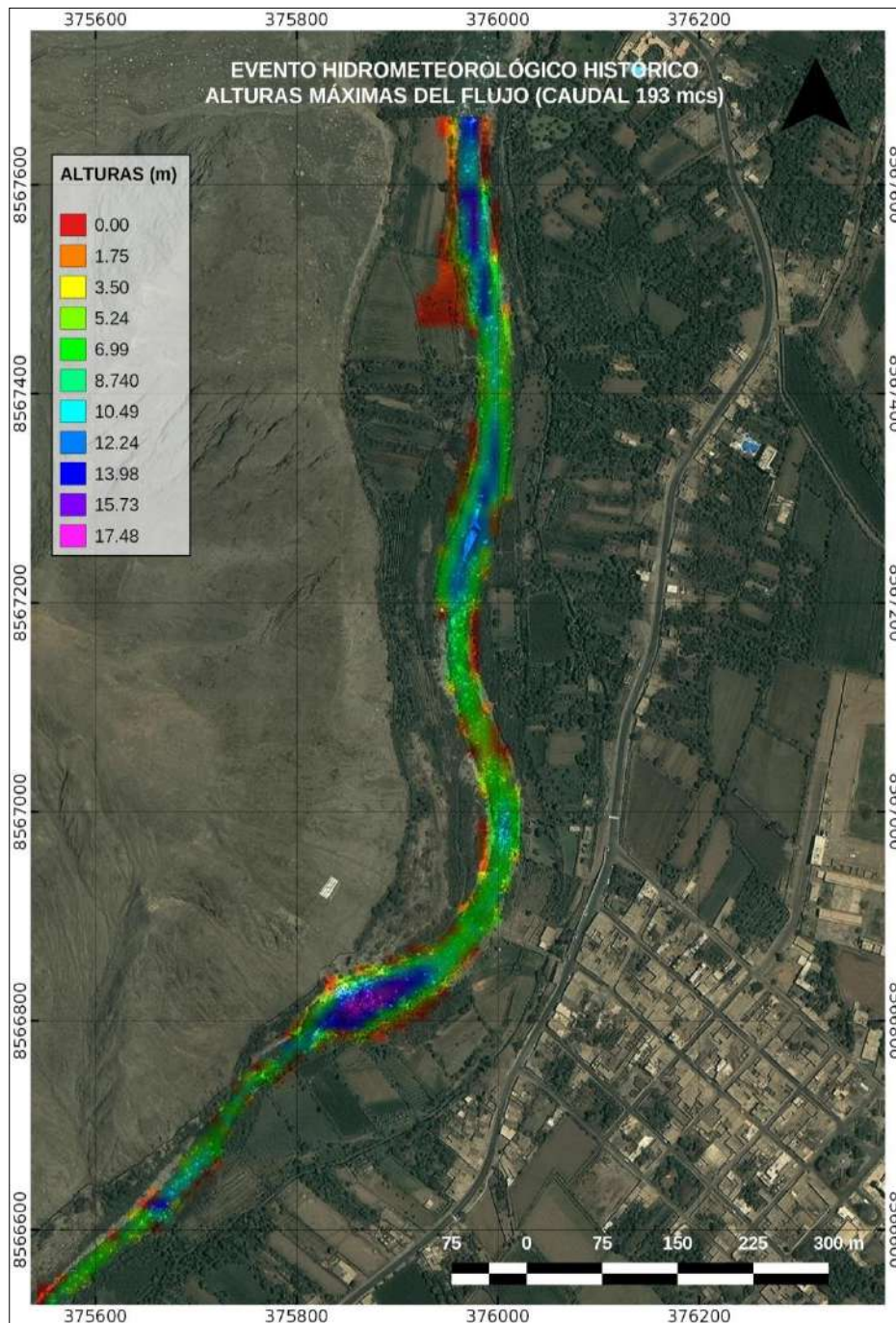


Figura 58: Vista en planta de las alturas máximas del flujo para un caudal histórico en un evento hidrometeorológico histórico de  $193 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

## 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 Lunahuaná se recolectó información según las siguientes técnicas:

**- Exploraciones a cielo abierto** (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Lunahuana se construyeron 7 calicatas (Tabla 2), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.0 metros y la mínima de 1.20 metros (ver Anexos). En la Figura 59 se muestra la distribución espacial de las calicatas.

Tabla 2: 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
C – 01	356913	8567979	579	1.20	N.P
C – 02	376511	8567496	522	3.00	N.P
C – 03	376319	8566982	495	2.60	N.P
C – 04	376334	8566526	501	2.70	N.P
C – 05	375797	8566458	487	1.80	N.P
C – 06	374890	8565844	482	2.50	N.P
C – 07	374452	8565057	444	3.00	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 3 se presenta los resultados obtenidos en cada punto de observación, los mismos 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.

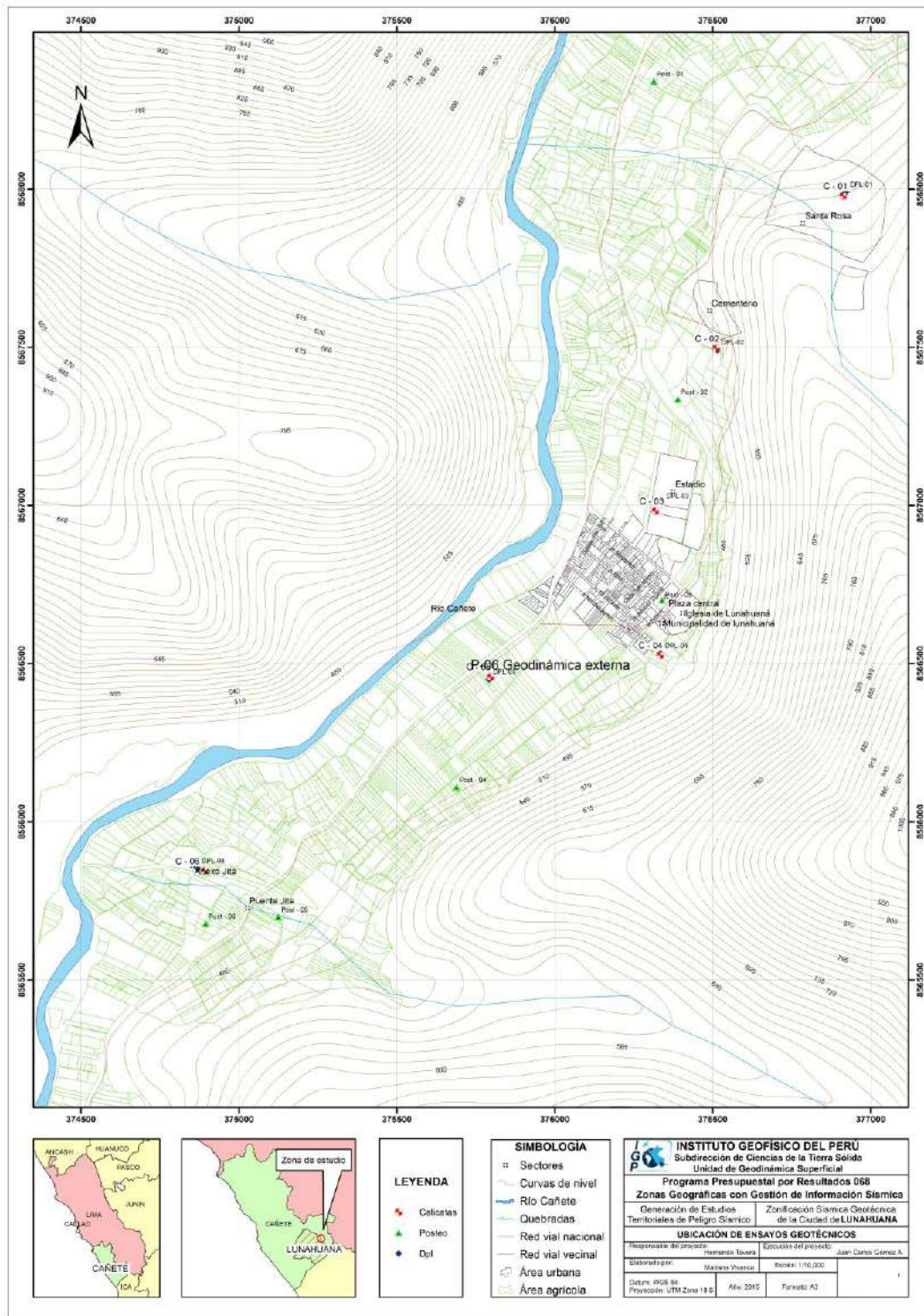


Figura 59: Mapa de ubicación de calicatas y posteos de suelos en la ciudad de Lunahuana

Tabla 3: Valores de densidades de suelo in situ

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
CA-01	DC-CA-01	1.20	1.22	1.19
CA-02	DC-CA-02	3.00	1.12	1.04
CA-03	DC-CA-03	2.60	N.P	N.P
CA-04	DC-CA-04	2.70	1.65	1.64
CA-05	DC-CA-05	1.80	N.P	N.P
CA-06	DC-CA-06	2.50	0.60	0.59
CA-07	DC-CA-07	3.00	1.53	1.45

**- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452):** A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 7 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 4), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 3.10 metros y la mínima del orden de 0.26 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 Lunahuaná.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos y clasificación SUCS

POSTEOS	ESTE(m)	NORTE(m)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD (m)	TIPO DE SUELO	NIVEL FREÁTICO
Post - 01	376314	8568341	518	0.40	SM	NP
Post - 02	376390	8567335	516	0.26	SM	NP
Post - 03	376340	8566700	487	1.80	SM	NP
Post - 04	375689	8566109	483	3.10	SM	NP
Post - 05	375125	8565698	494	0.30	SP	NP
Post - 06	374895	8565677	480	1.60	SP	NP
Post - 07	374326	8565183	439	0.60	SP	NP

**- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094):** Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 7 puntos dentro de la ciudad de Lunahuaná (Tabla 5). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 1.60 metros y mínima de 0.42 metros debido a que los suelos son de origen aluvial (gravas, arenas y arcillas limosas) con ángulos de fricción de 31° y 39° en promedio (ver Anexos). Esto valores indican suelos con

resistencia al corte favorable para el diseño de cimentaciones, son de consistencia compacta.

Tabla 5: 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)	NUMERO DE GOLPES	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA ( $\phi$ )
DPL-01	376922	8567990	573	0.42	18	32.7
DPL-02	376515	8567491	525	1.20	23	34.1
DPL-03	376340	8567004	500	1.20	15	31.7
DPL-04	376336	8566531	501	0.70	45	39.7
DPL-05	375792	8566450	486	0.70	20	33.3
DPL-06	374870	8565851	481	0.60	45	39.7
DPL-07	374457	8565066	447	1.60	20	33.3

$\phi$  = 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 Lunahuaná. Se ha identificado la existencia de 4 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 60 y Tabla 6):

**- Suelos tipo GW:** Están conformados por gravas arenosas bien graduadas. Su contenido de humedad es de 4.24 %, y se consideran como suelos semi compactos, no presentan plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Ocupan el 30 % de los suelos de la ciudad de Lunahuaná y han sido identificados en áreas de cultivos y parte del Anexo Jita. Este tipo de suelo corresponde a la calicata C-05, realizada cerca a la Posta Médica de Lunahuaná.

**- Suelos tipo GM:** Están conformados por gravas arenosas bien graduadas. Su contenido de humedad es de 3.60 %, y se consideran como suelos semi compactos, no presentan plasticidad. Ocupan el 30 % de los suelos de la ciudad de Lunahuaná y han sido identificados en el casco urbano del área de estudio y

la parte noreste de la ciudad. Este tipo de suelo corresponde a la calicata C-03 realizada en el Estadio de Municipal de Lunahuaná.

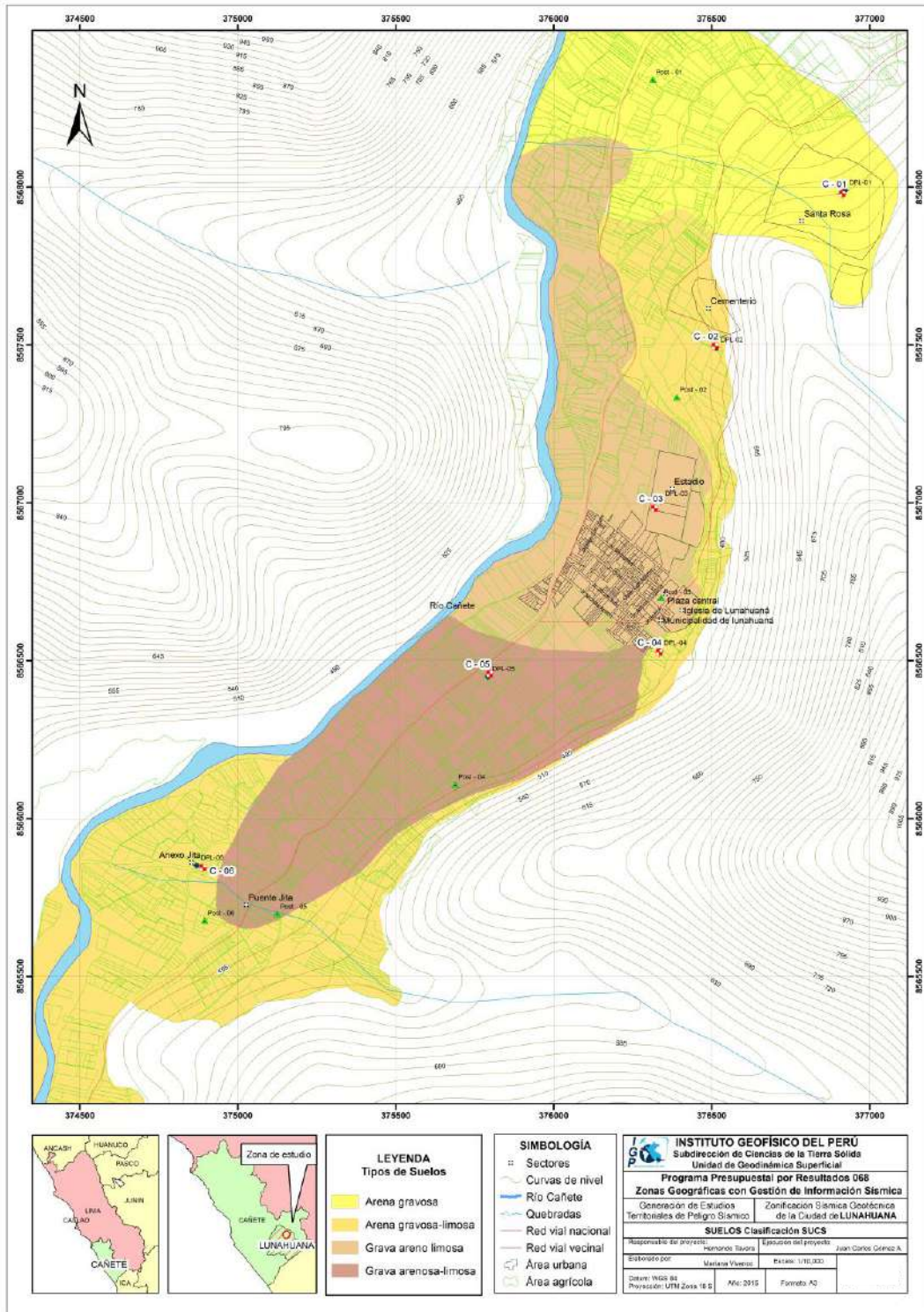


Figura 60: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Lunahuaná y alrededores

Tabla 6: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Lunahuaná (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)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUC'S	DENOMINACIÓN
C - 01	1.20	NP	22.4	49.1	0.7	-	-	NP	2.89	SP	Arena gravosa, limosa
C - 02	3.00	NP	35	58	7	-	-	N.P	2.90	SW	Arena limosa, gravosa
C - 03	2.60	NP	60	35	5	-	-	N.P	3.60	GM	Grava arenosa, limosa
C - 04	2.70	NP	40	56	4	-	-	N.P	3.20	SW	Arena gravosa, limosa
C - 05	1.80	NP	61	19	20	-	-	N.P	4.24	GW	Grava bien gradada, limosa
C - 06	2.50	NP	10	75	15	-	-	N.P	3.40	SW	Arena limosa, gravosa
C-07	3.00	NP	33	53	14	-	-	N.P	5.16	SW	Arena limosa, gravosa

**.- Suelos tipo SW:** Están conformados por arenas bien graduadas con contenido de grava y limos. Su contenido de humedad es de 2.90 %, y se consideran como suelos semi compactos, no presenta plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Ocupan el 30 % de los suelos de la ciudad de Lunahuaná y han sido identificados en el Anexo Jita (60 % ubicado al Suroeste de la ciudad de Lunahuaná) y en el cementerio. Este tipo de suelo corresponde a las calicatas C-02, C-04, C-06 y C-07 realizadas a los alrededores del casco urbano de la ciudad de Lunahuaná.

**.- Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas con contenido de grava y limos. Su contenido de humedad es de 2.89 %, se consideran como suelos semi compactos, no presenta plasticidad. Ocupan el 20 % de los suelos de la ciudad de Lunahuaná y han sido identificados en el Barrio Santa Rosa. Este tipo de suelo corresponde a la calicata C-01 realizada en el barrio Santa Rosa.

## 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 ( $P_v$ ) y luego una carga horizontal ( $P_h$ ) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

El resultado del análisis de siete (7) muestras extraídas de campo se muestran en la Tabla 7. Los resultados obtenidos muestran que los suelos en el área urbana de Lunahuaná presentan bajos valores de cohesión; mientras que, los valores para los ángulos de fricción interna son mayores a  $28^\circ$ , característico de suelos

conformados por arenas sueltas mal graduadas con contenido de gravas. En el caso de las calicatas C-02, C-03 y C-04 no se han obtenido datos de cohesión y ángulo de fricción debido al alto contenido de gravas, pero si los valores de densidad máxima y mínima.

Tabla 7: Resultados del ensayo de corte directo

Muestra	Ángulo De Fricción Interna Del Suelo ( $\phi$ )	Cohesión Aparente Del Suelo ( $Tn/m^2$ )	Densidad Natural ( $gr/cm^3$ )
CA-01	N.P	N.P	1.22
CA-02	N.P	N.P	1.85
CA-03	N.P	N.P	1.89
CA-04	N.P	N.P	1.86
CA-05	N.P	N.P	1.24
CA-06	28.60	0.01	1.69
CA-07	N.P	N.P	1.53

### 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 Lunahuaná 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 seis puntos analizados se presentan en la Tabla 8.

Considerando la clasificación de la Tabla 9, se ha determinado que gran parte del área urbana de la ciudad de Lunahuaná se asienta sobre suelos con la siguiente capacidad de carga admisible (Figura 61):

**- Capacidad de carga admisible baja:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible entre 1.00 - 2.00  $kg/cm^2$ , corresponde al tipo de suelo arenas (SW) cuyo grado de compactación es bajo. Abarca menos del 40% del área de estudio y se encuentran cubriendo la zona de sembríos.

Tabla 8: Capacidad de carga admisible, ciudad de Lunahuaná

Muestra	Capacidad De Carga Última (Tn/M <sup>2</sup> )	Capacidad De Carga Admisible (kg/Cm <sup>2</sup> )
CA-01	121.30	3.04
CA-02	122.27	3.06
CA-03	147.74	3.69
CA-04	127.66	3.19
CA-05	146.76	3.70
CA-06	49.76	1.66
CA-07	48.50	1.67

Tabla 9: Rangos de capacidad de carga admisible

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

**.- Capacidad de carga admisible alta:** Comprende rangos de capacidad de carga admisible mayores a 3.00 kg/cm<sup>2</sup>, se encuentran representados por dos tipos de suelos: Grava bien graduada (GW) y grava mal graduada (GP), cuyo grado de compactación es medio. Representa el 40% del área de estudio y se encuentra cubriendo el casco urbano y las inmediaciones de la ciudad de Lunahuaná.

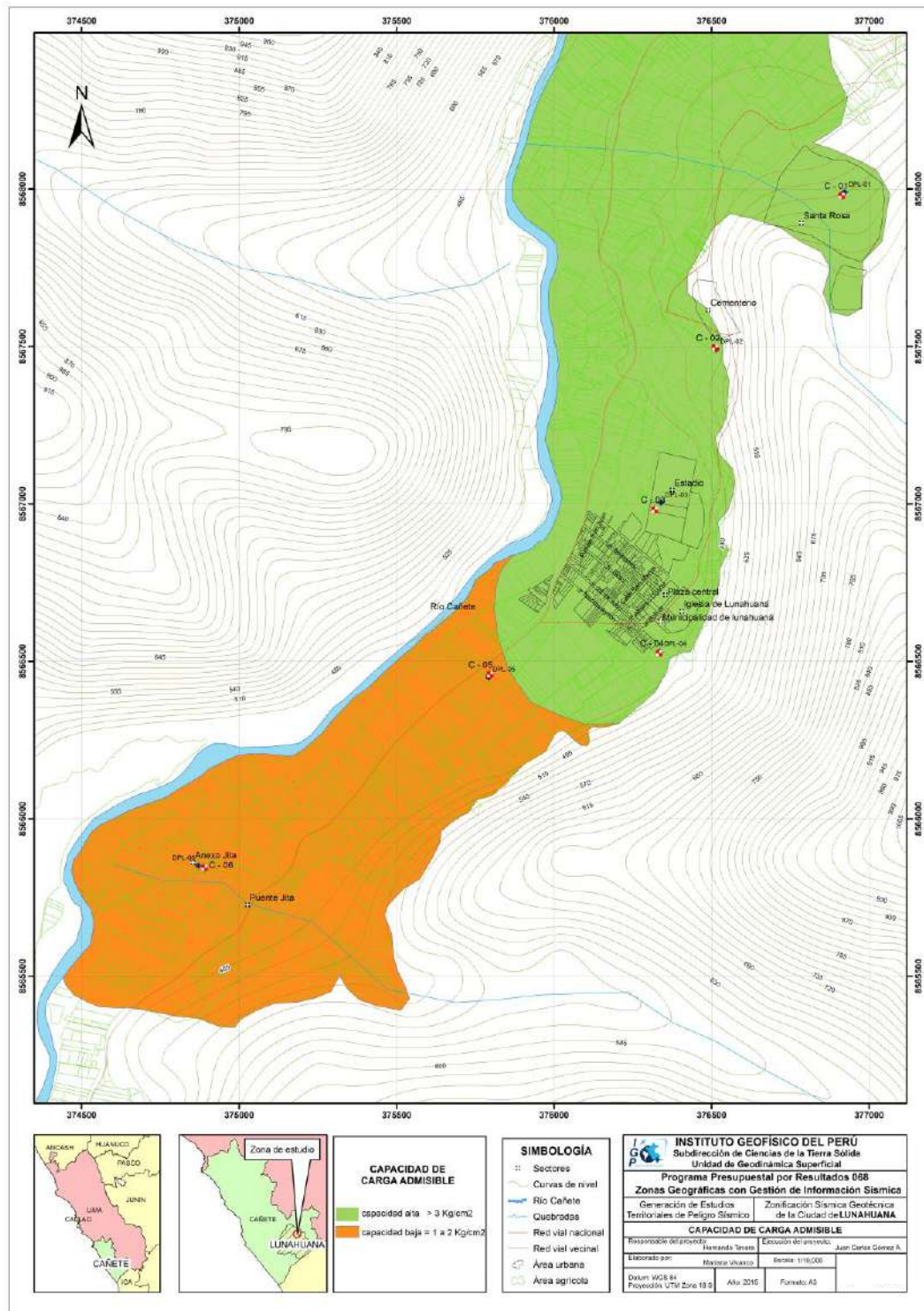


Figura 61: Mapa de capacidad de carga admisible en la ciudad de Lunahuaná y alrededores

## 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 Lunahuaná 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 Lunahuaná 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 62 se muestra la distribución espacial de los 110 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 63 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto LH-88. 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 4.29 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

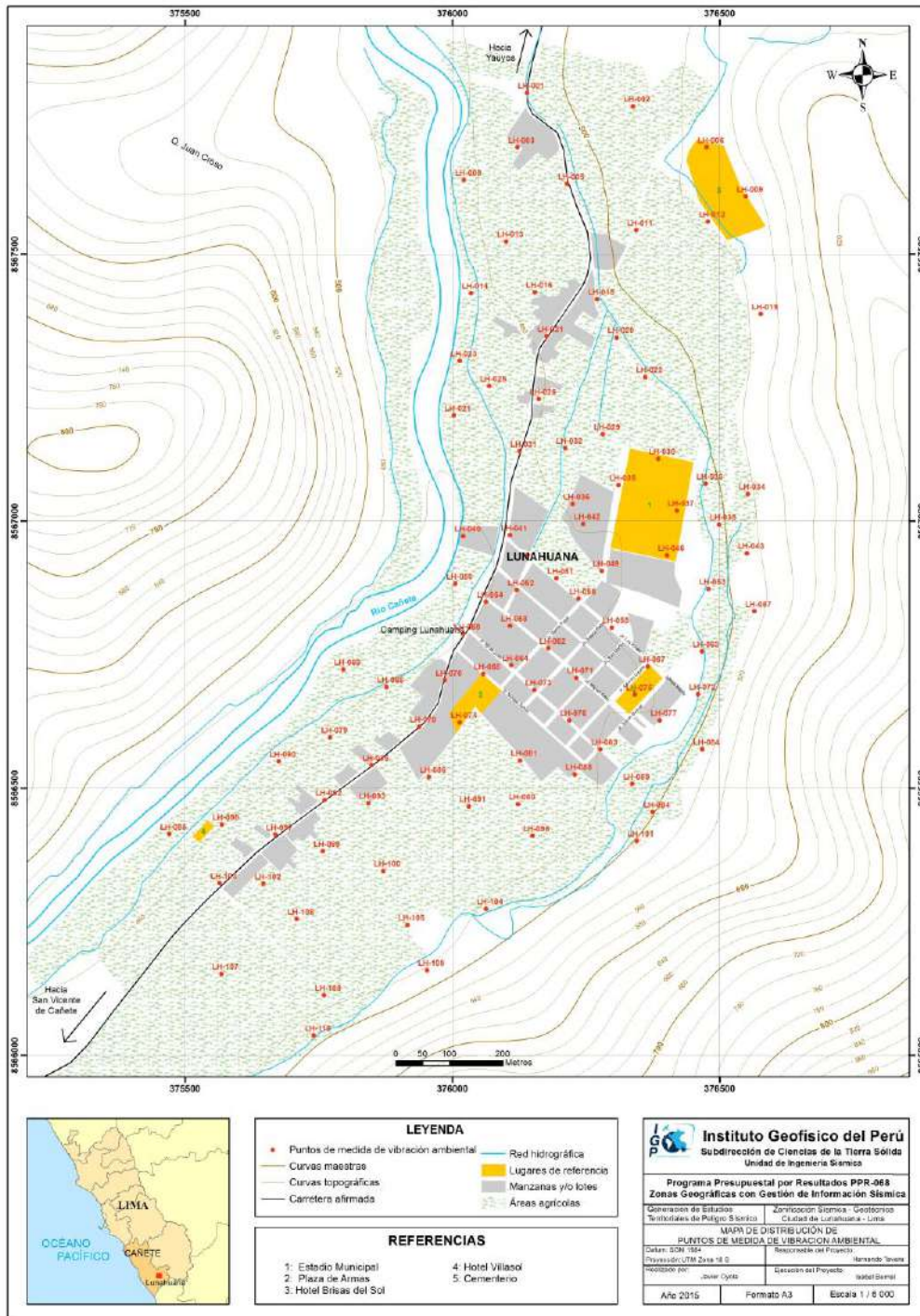


Figura 62: Mapa de la ciudad de Lunahuaná y alrededores: distribución de puntos de registro de vibración ambiental

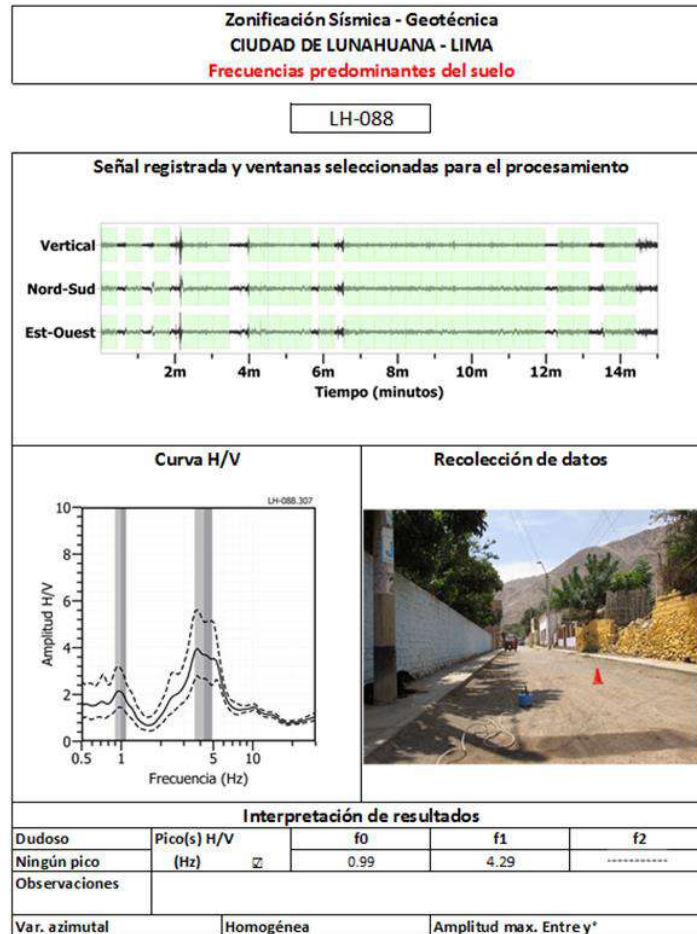


Figura 63: Ejemplo de la ficha H/V para el punto LH-88 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Abajo: resultados.

**- 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 de las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis dos rangos de frecuencia:  $F_0$  ( $F < 2.0\text{Hz}$ ) y  $F_1$  ( $F \geq 2.0\text{Hz}$ ) 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 Lunahuaná.

***.- Frecuencias predominantes  $F_0$  ( $F < 2.0\text{Hz}$ ):*** Se presentan en el 95% de los puntos donde se recolectó información (Figura 64). Según la curva del promedio de las razones espectrales, este rango de frecuencias presenta menores amplificaciones y mayor desviación estándar. En la Figura 65, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidos para los puntos LH-021, LH-067 y LH-102, ubicados en el extremo Norte, centro y Sur del área urbana de Lunahuaná. En ellos sobresalen dos picos, el primero a frecuencias de 1.3, 1.4 y 1.5Hz y el segundo a 3.2, 4.1 y 3.0 Hz con amplificaciones relativas de hasta 5 veces

***.- Frecuencias predominantes  $F_1$  ( $F \geq 2.0\text{Hz}$ ):*** Este rango de frecuencias se distribuyen sobre todo el valle de Lunahuaná. En el centro predominan valores que fluctúan entre 3.0 a 4.0 Hz y conforme se tiende hacia su extremo Este (zonas a mayor cota), estos valores se incrementan hasta 10 Hz (Figura 66).

En la Figura 67, se muestran ejemplos de razones espectrales característicos para la zona considerando diferentes niveles de elevación. En los puntos LH-75, LH-83 y LH-88, todos ubicados hacia la margen izquierda del río Cañete (cota: 460 m.sn.m.), sobresalen frecuencias de 3.2, 3.7 y 3.9 Hz con amplificaciones relativas de hasta 5.8 veces. En los puntos LH-26, LH-62, LH-86, ubicados próximos a la carretera principal, hacia el extremo Norte, Centro y Sur del área urbana (cota: entre los 460 y 480 m.sn.m.), sobresalen dos rangos de frecuencias entre 1.2 a 1.5 Hz y de 3.0 a 3.2 Hz, todos con amplificaciones de hasta 6 veces. La curva promedio de las razones espectrales hacia los extremos Norte y Sur, muestran mayor dispersión de valores.

Para el extremo Este de la ciudad, se considera los puntos LH-30, LH-75, LH-88, todos ubicados en el Estadio Municipal, la Plaza de Armas y en la última cuadra del Jr. Nicolás Ayllón (cota: entre los 480 y 500 m.s.n.m.), donde sobresalen frecuencias a 4.0, 4.2 y 4.4 Hz con amplificaciones de hasta 4.4

veces. Según la curva promedio de razones espectrales, en el punto ubicado en el estadio, sobresale una banda de frecuencias con picos a 1.2 y 4.0 Hz con amplificaciones de 7.8 y 4.4 veces, lo cual evidencia que conforme se tiende hacia el extremo norte del área urbana, los suelos son menos competentes que lo observado en el centro del área de estudio.

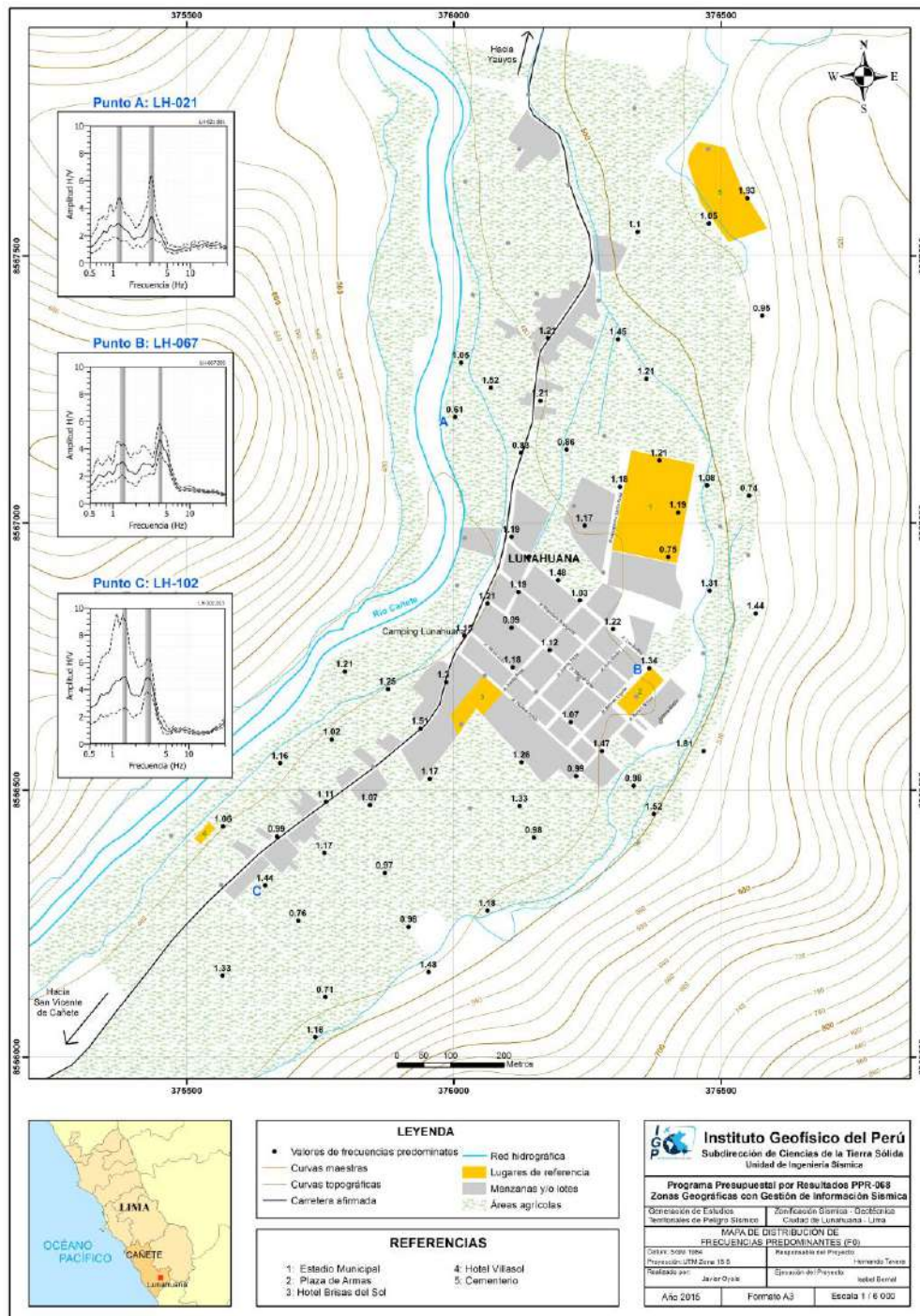
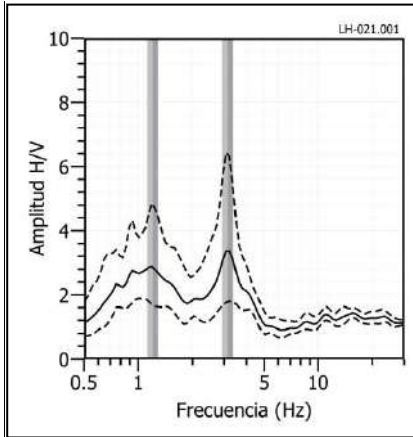
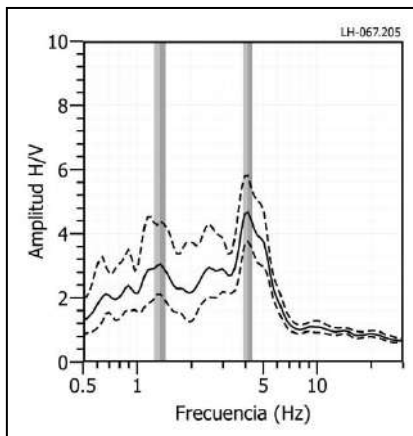


Figura 64: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes

**LH - 021**



**LH - 067**



**LH - 102**

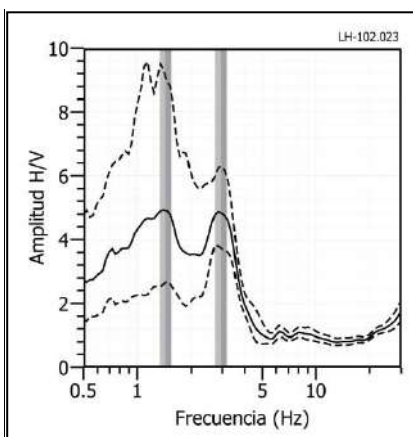


Figura 65. Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F < 2.0\text{Hz}$ ): Para los puntos LH-021, LH-067 y LH-102, ubicados en el extremo Norte, centro y Sur del área urbana de Lunahuaná. Las líneas continuas representan el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

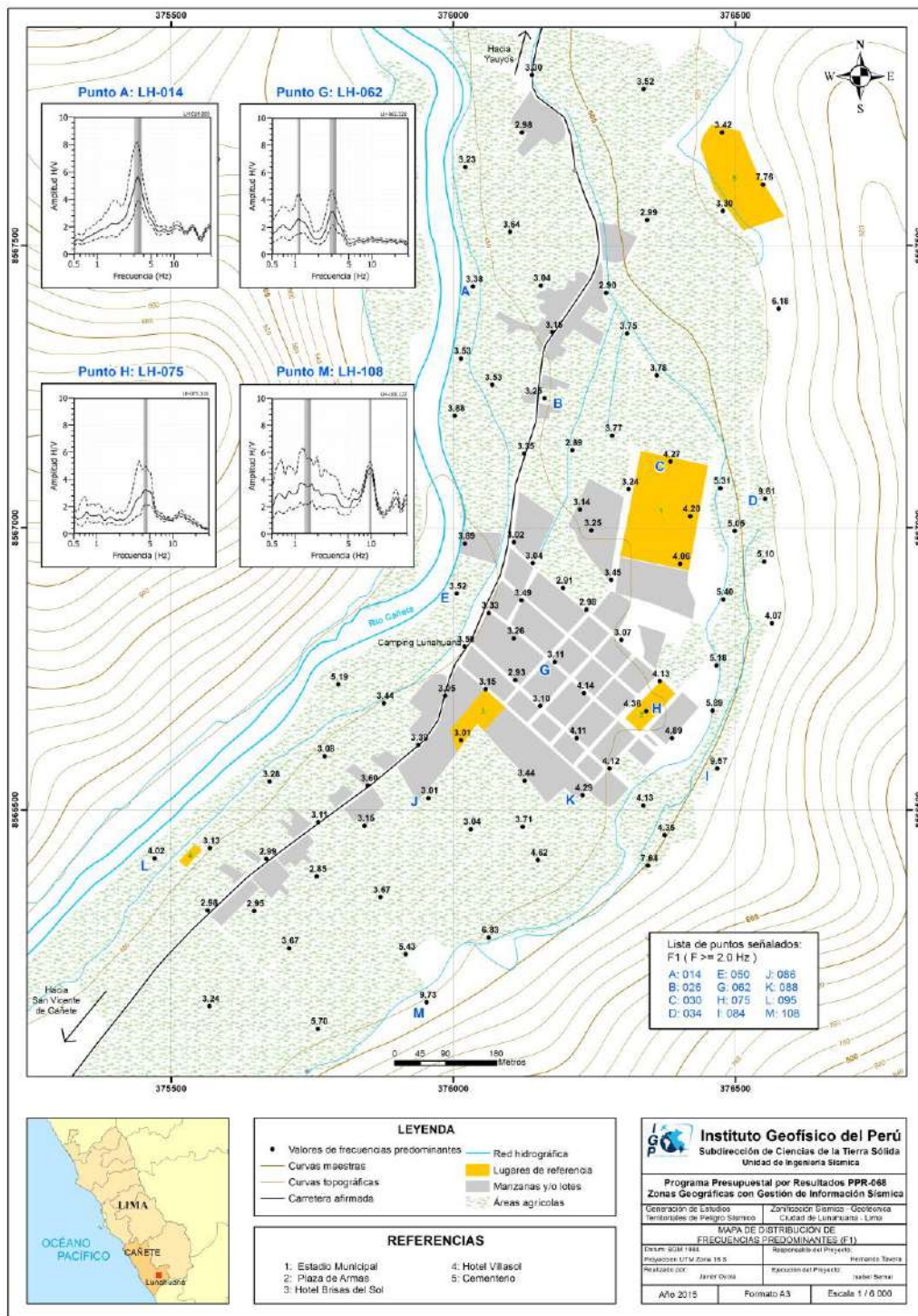
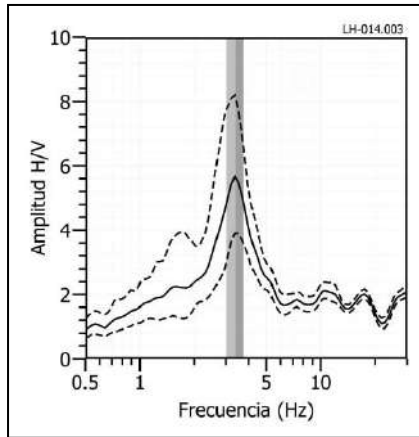
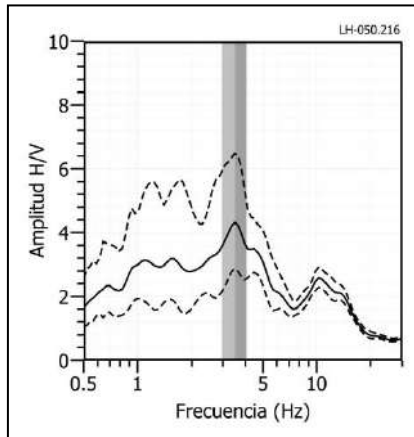


Figura 66: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ( $F \geq 2.0$  Hz).

**LH - 014**



**LH - 050**



**LH - 095**

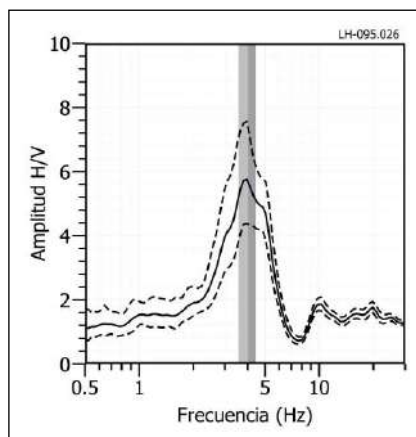
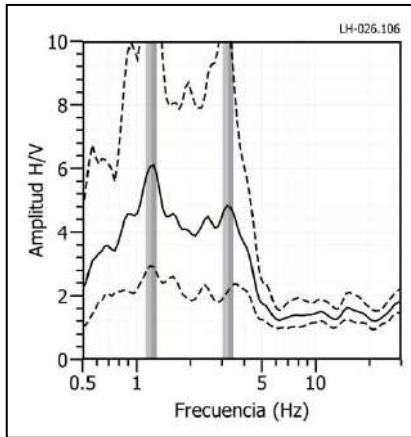
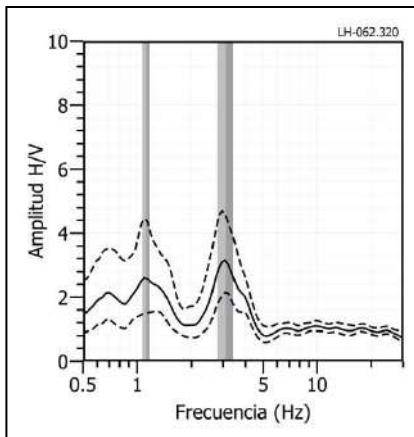


Figura 67: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 2.0\text{Hz}$ ). Para los puntos LH-14, LH-50 y LH-95, ubicados en la Margen izquierda del Río Cañete. Las líneas continuas representan el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**LH - 026**



**LH - 062**



**LH - 086**

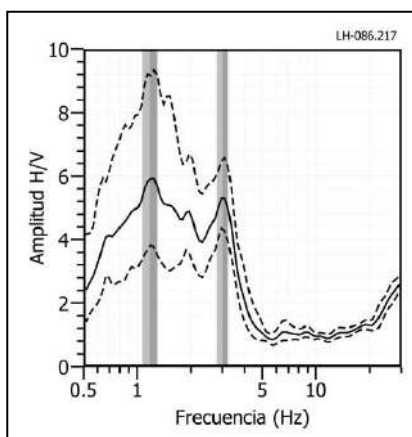
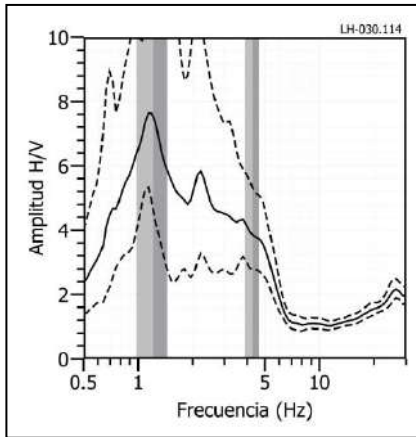
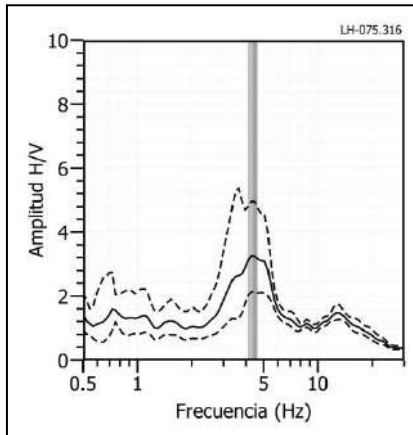


Figura 67: ...Continuación... / Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 2.0\text{Hz}$ ). Para los puntos LH-26, LH-62 y LH-86, ubicados próximos a la carretera principal, hacia el extremo Norte, Centro y Sur del área urbana. Las líneas continuas representan el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**LH - 030**



**LH - 075**



**LH - 088**

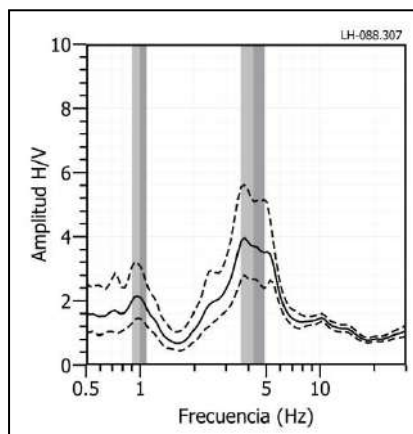


Figura 67: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 2.0$ Hz). Para los puntos LH-30, LH-75 y LH-88, ubicados en el Estadio Municipal, Plaza de Armas y en la última cuadra del Jr. Nicolás Ayllón respectivamente. Las líneas continuas representan el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

*En los puntos LH-34, LH-84, LH-108, ubicados en la periferia del extremo Este del área de estudio (cota de entre 500 y 520 m.s.n.m.), sobresalen frecuencias de entre 9 y 10 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces.*

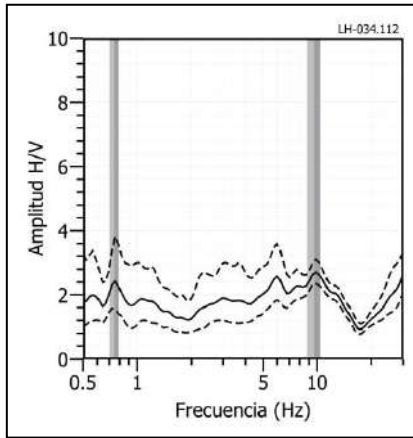
Según los resultados obtenidos, en la ciudad de Lunahuaná predominan frecuencias entre 3.0 y 4.0 Hz, y sus características están de acuerdo a la topografía de la zona. Por ejemplo, próximo al río presentan amplificaciones máximas relativas de hasta los 6 veces, y en el centro del área urbana, de hasta 4 veces. Por otro lado, conforme se tiende hacia los cerros, las frecuencias tienden a valores mayores del orden de 10 Hz, con mínimas amplificaciones relativas. Estos resultados evidencian que los suelos en la ciudad de Lunahuaná son consistentes, excepto próximo al río Cañete que son mayormente flexibles.

### **11.2.- Estudios sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos**

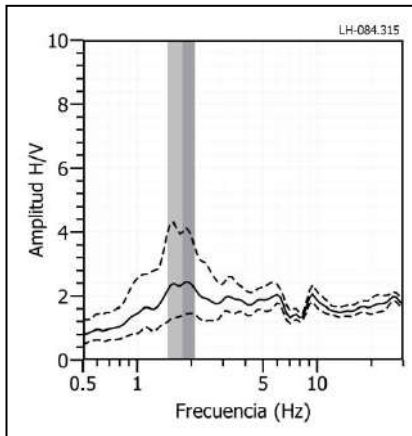
La técnica MASW (Multichannel Análisis of Surface Waves) permite conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el subsuelo a partir del análisis de la dispersión de ondas superficiales registradas por arreglos lineales de estaciones sísmicas. Como resultado de la inversión de la curva 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.

**LH - 034**



**LH - 084**



**LH - 108**

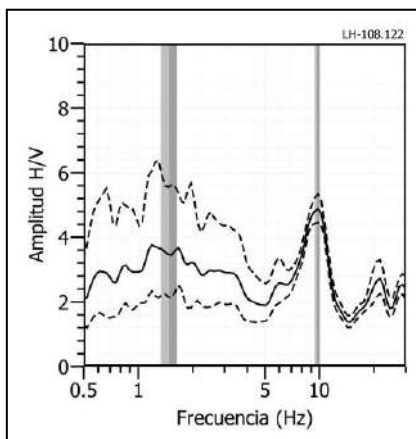


Figura 67: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $F \geq 2.0\text{Hz}$ ). Para los puntos LH-34, LH-84 y LH-108, ubicados en el extremo Este del área urbana de Lunahuaná (cota 500 m.s.n.m.). Las líneas continuas representan el promedio de las razones espectrales y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

En la Figura 68, se presenta el mapa de la ciudad de Lunahuaná con la distribución espacial de 8 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-LH., LS08-LH, y en la Tabla 10 las coordenadas de cada línea.

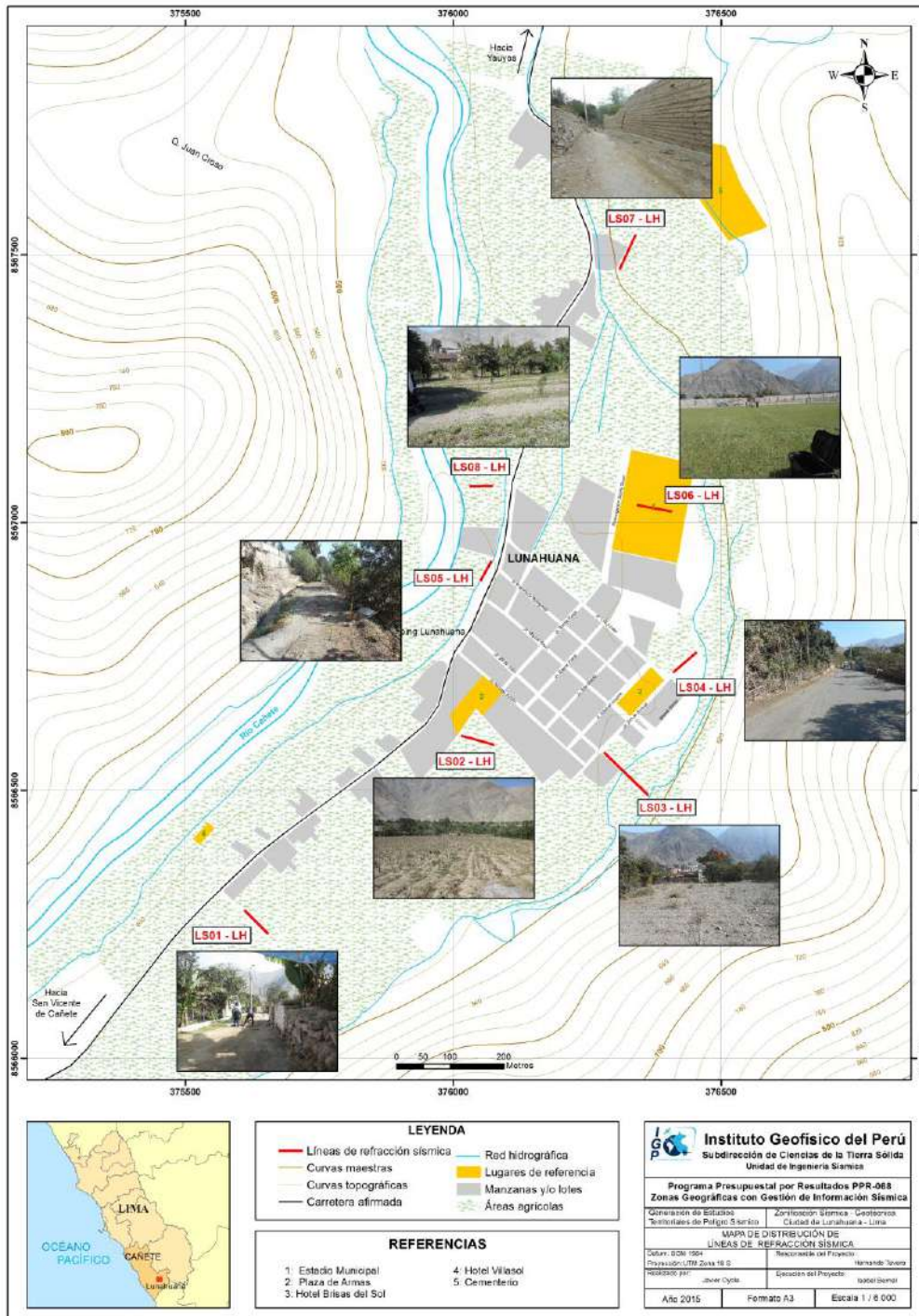


Figura 68: Mapa de la ciudad de Lunahuaná y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-LH, ..., LS8-LH.

Tabla 10. 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-LH	375610	8566277	475	3	69
	375655	8566232	475		
LS02-LH	376076	8566585	491	3	69
	376015	8566602	491		
LS03-LH	376364	8566491	507	5	115
	376281	8566571	493		
LS04-LH	376454	8566758	497	2.5	57.5
	376410	8566720	496		
LS05-LH	376050	8566891	485	2	46
	376071	8566929	485		
LS06-LH	376408	8567021	495	3	69
	376342	8567033	495		
LS07-LH	376310	8567472	520	3	69
	376340	8567537	522		
LS08-LH	376030	8567068	488	2	46
	376073	8567069	491		

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)

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 Lunahuaná (Figura 69).

**- Línea sísmica LS01-LH:** Línea sísmica realizada frente al restaurant Campestre Guanabo, extremo suroeste de la ciudad. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 17 metros, indicando la presencia de suelos conformados por una capa de 5 metros de espesor y velocidad de 383 m/s, que corresponde a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 562 m/s y corresponde a suelos muy duros o rocas moderadamente blandas (Figuras 69a).

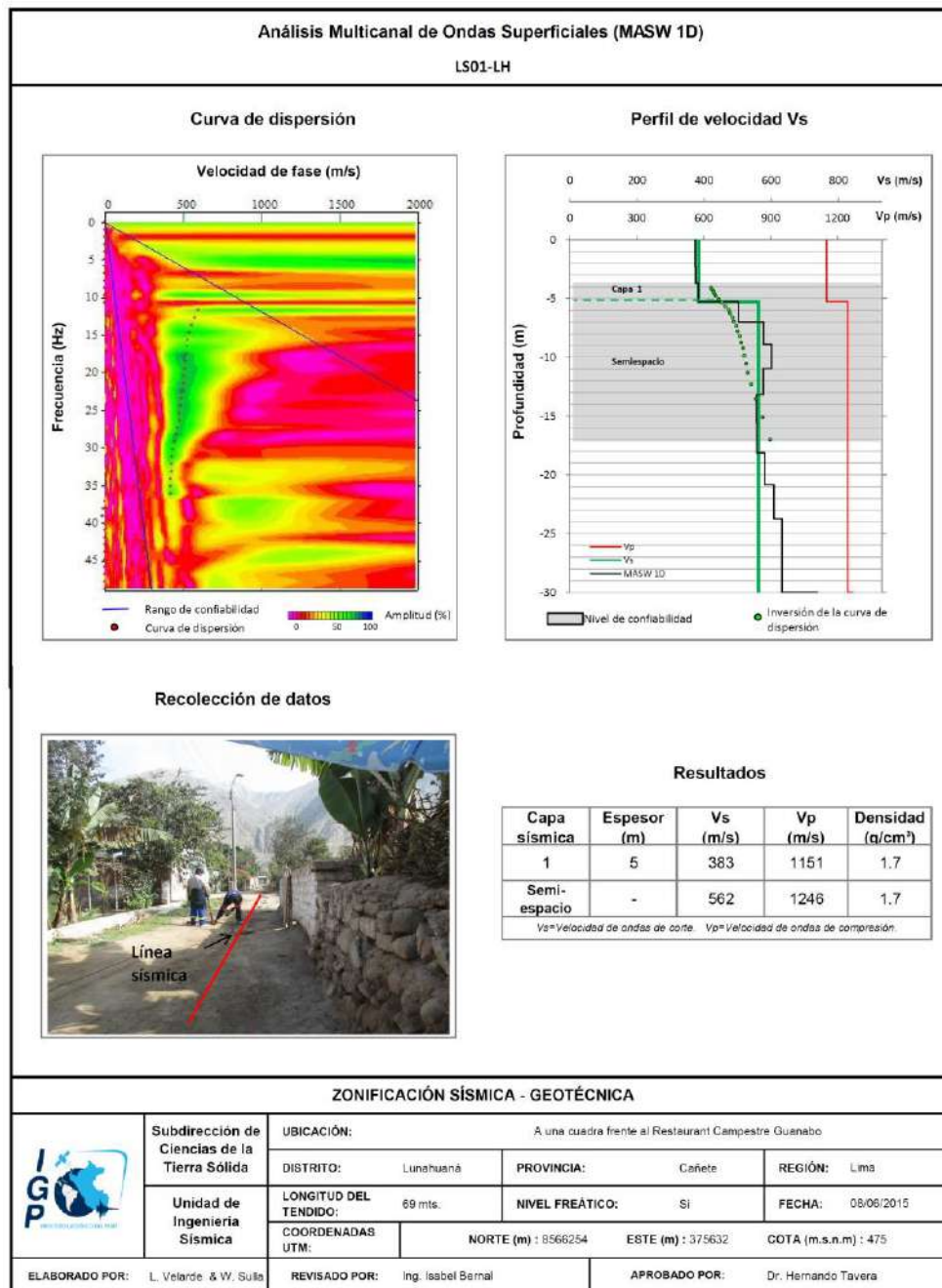


Figura 69. a) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS01- LH.

**- Línea sísmica LS02-LH:** Línea sísmica realizada a una cuadra del jirón Nicolás Ayllón, extremo sur de la ciudad. El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 21 metros, indicando la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 2 metros de espesor y  $V_s$  de 281 m/s, corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 7 metros de espesor con velocidad  $V_s$  de 399 m/s, corresponde a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades  $V_s$  de 582 m/s, que sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 69b).

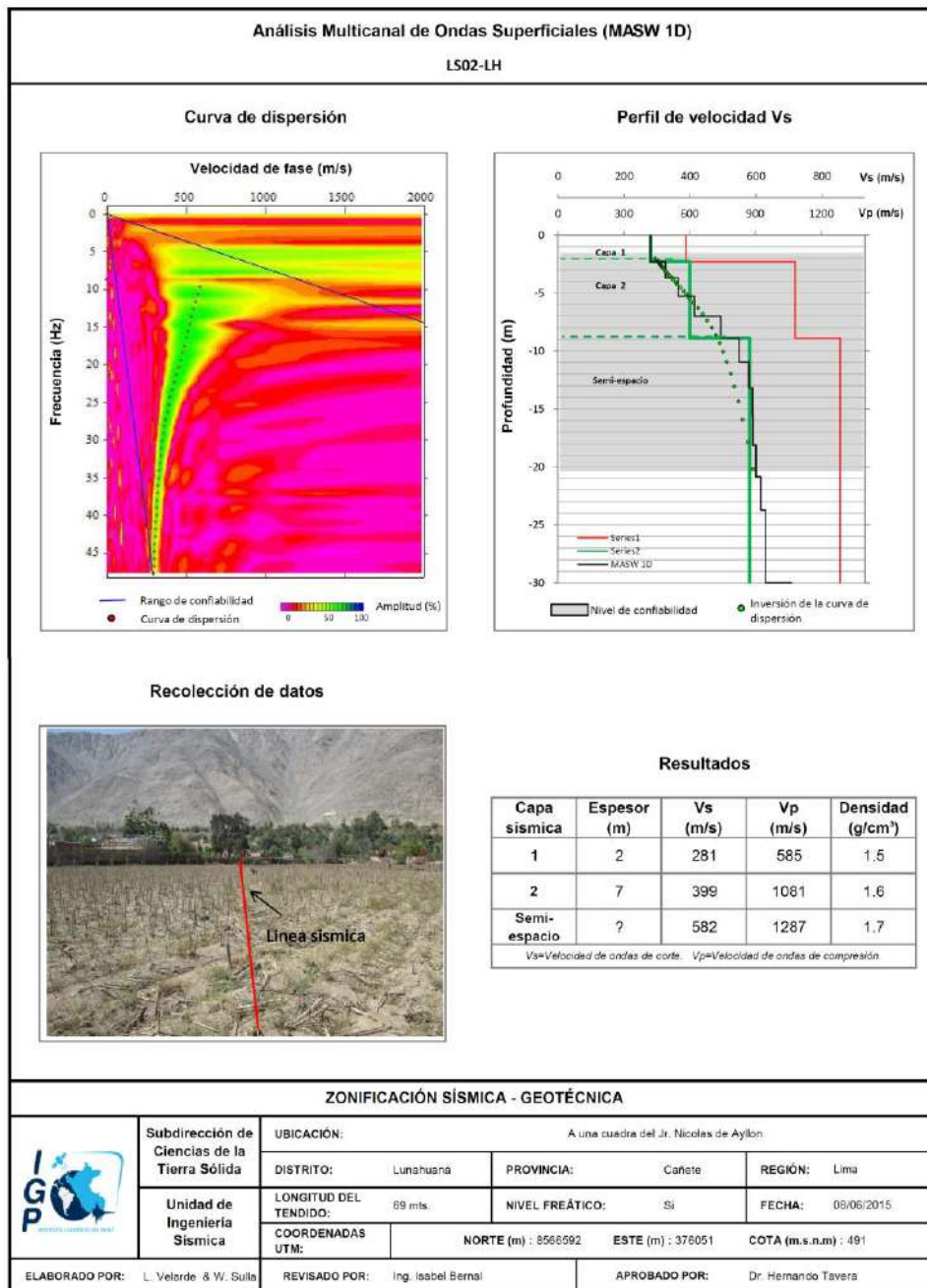


Figura 69. b) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS02 - LH.

**- Línea sísmica LS03-LH:** Realizada en cruce del jirón 28 de Julio con Bolívar, extremo SE de la ciudad. El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 28 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 7 metros de espesor, con  $V_s$  de 282 m/s, corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 4 metros de espesor con una  $V_s$  de 339 m/s, corresponde a suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta  $V_s$  de 500 m/s, corresponde a suelos muy duros o roca moderadamente dura (Figura 69c).

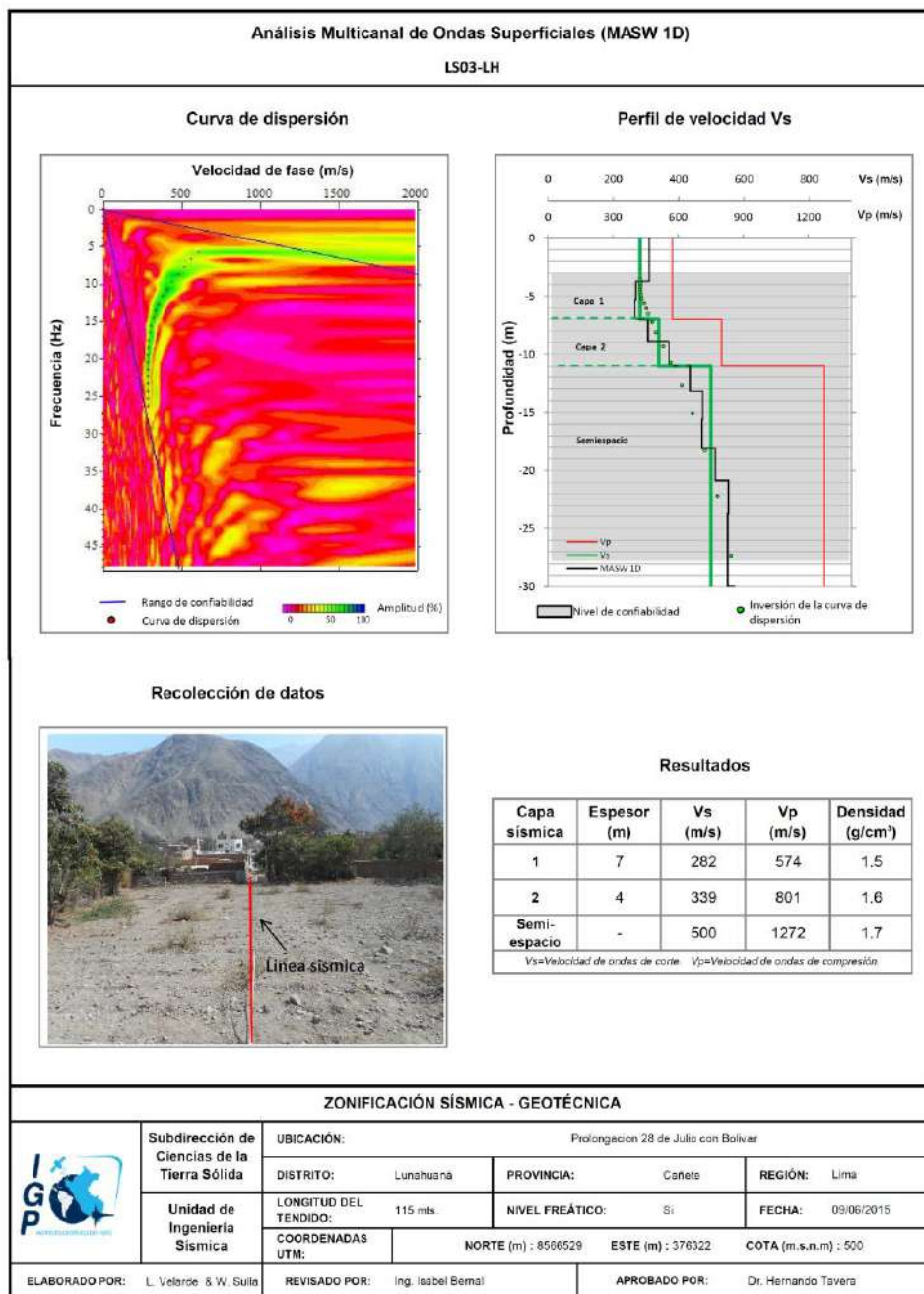


Figura 69. c) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS03 - LH.

**.- Línea sísmica LS04-LH:** Realizada a una cuadra de la plaza de Armas de Lunahuaná, extremo SE de la ciudad. El perfil de Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 26 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera con un espesor de 5 metros y Vs de 240 m/s, corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda capa de 8 metros de espesor y Vs de 359 m/s, corresponde a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta una Vs de 502 m/s, que sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 69d).

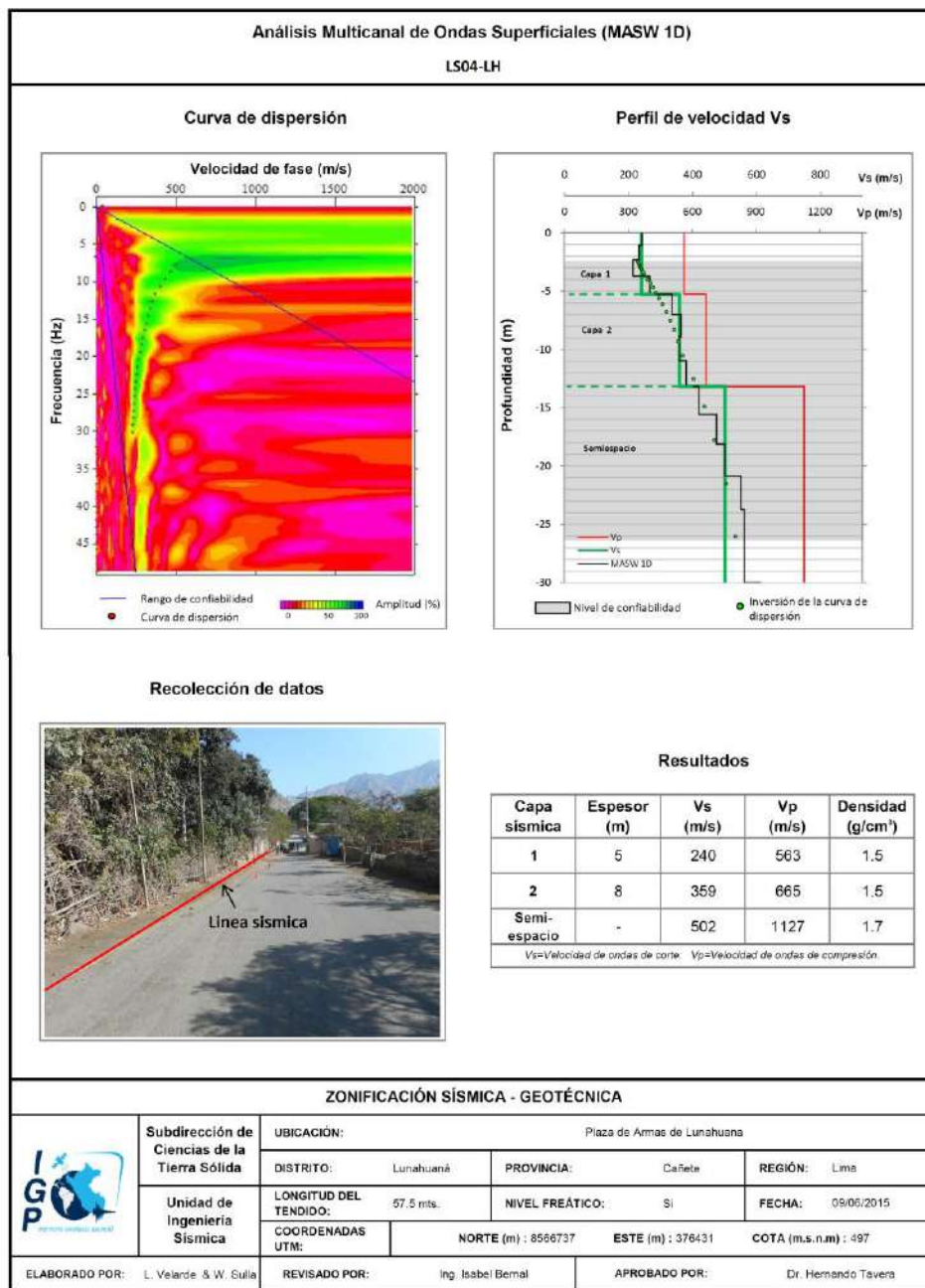


Figura 68. d) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS04 - LH.

**.- Línea sísmica LS05-LH:** Realizada en cruce carretera Cañete-Yauyos con jirón Bolognesi, extremo oeste de la ciudad. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 26 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 7 metros de espesor y Vs de 264 m/s, corresponde a suelos moderadamente duros. La segunda de 4 metros de espesor con Vs de 403 m/s. La superficie de contacto con el semiespacio presenta Vs de 531 m/s, indica suelos muy duros o roca blanda (Figura 69e).

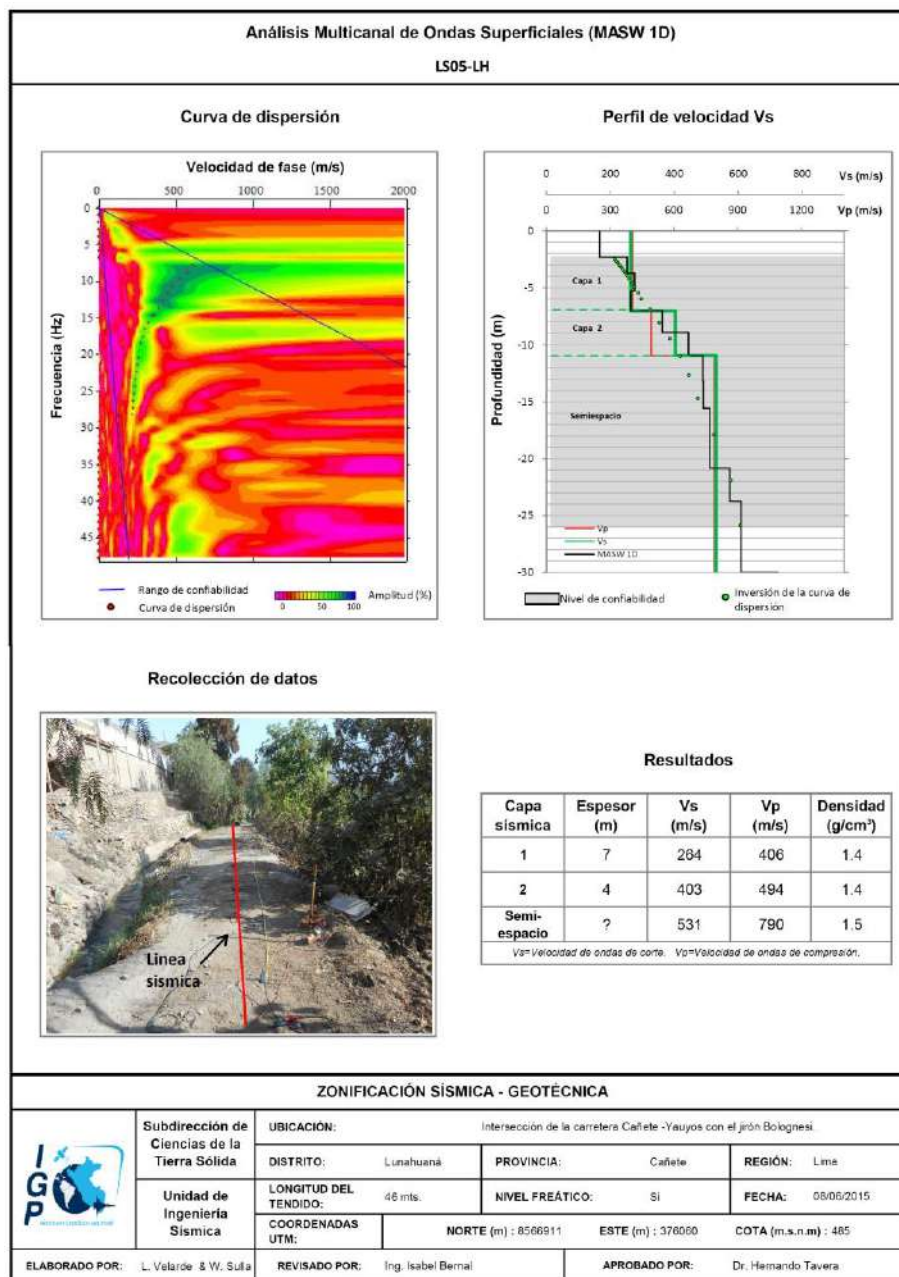


Figura 69. e) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS05 - LH.

**- Línea sísmica LS06 - LH:** Realizada en el Estadio Municipal, extremo este de la ciudad. El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 26 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 4 metros de espesor y  $V_s$  de 234 m/s, sugiere suelos moderadamente duros. La segunda capa de 9 metros de espesor y  $V_s$  de 401 m/s que corresponde a suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta  $V_s$  mayores a 714 m/s, sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 69f).

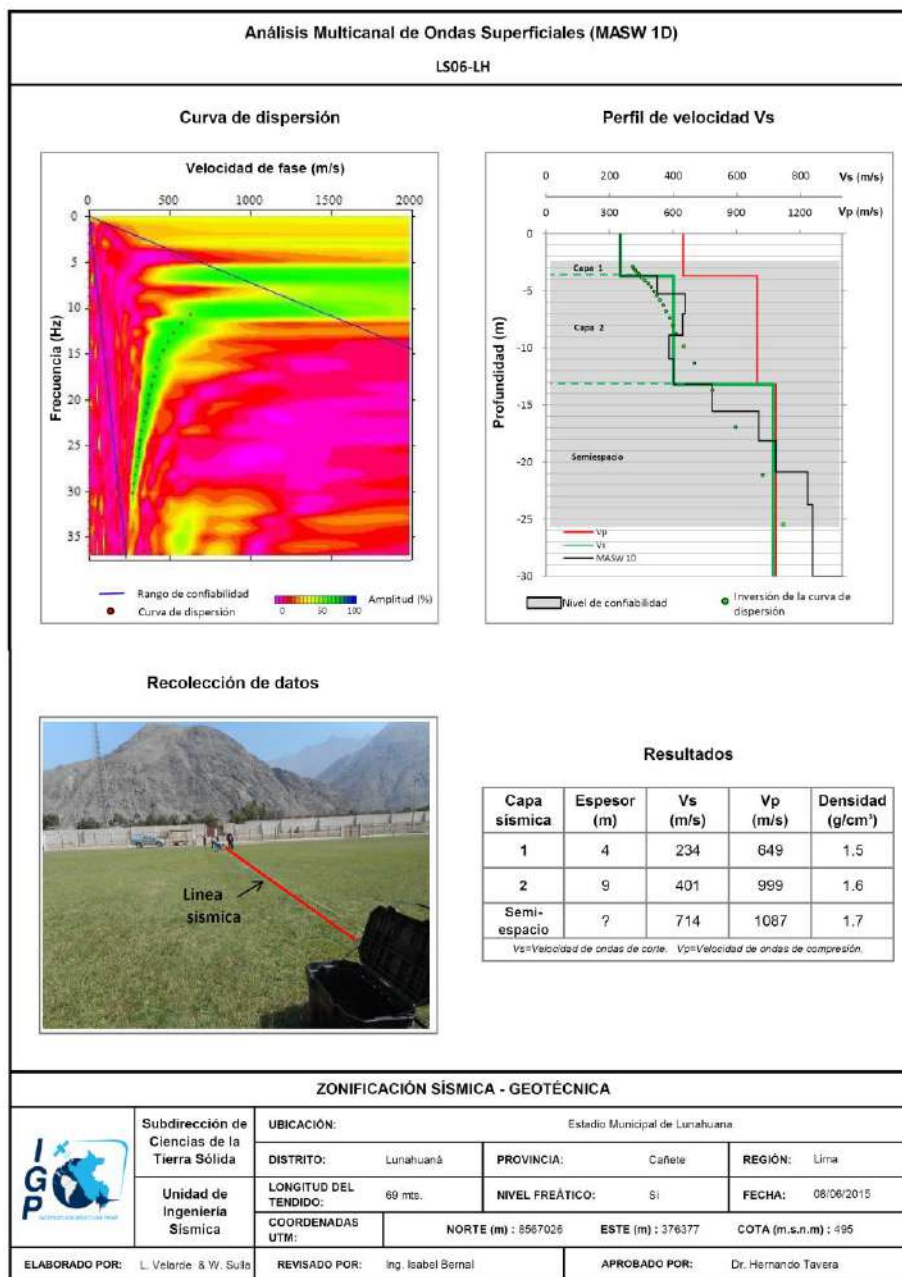


Figura 69. f) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS06 - LH.

**.- Línea sísmica LS07 - LH:** Realizada a dos cuadras del Hotel Regina, extremo norte de la ciudad. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 24 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 5 metros de espesor y Vs de 289 m/s, sugiere suelos moderadamente duros, asentada sobre una segunda capa de 4 metros de espesor y Vs de 463 m/s, indica suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 690 m/s sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 69g).

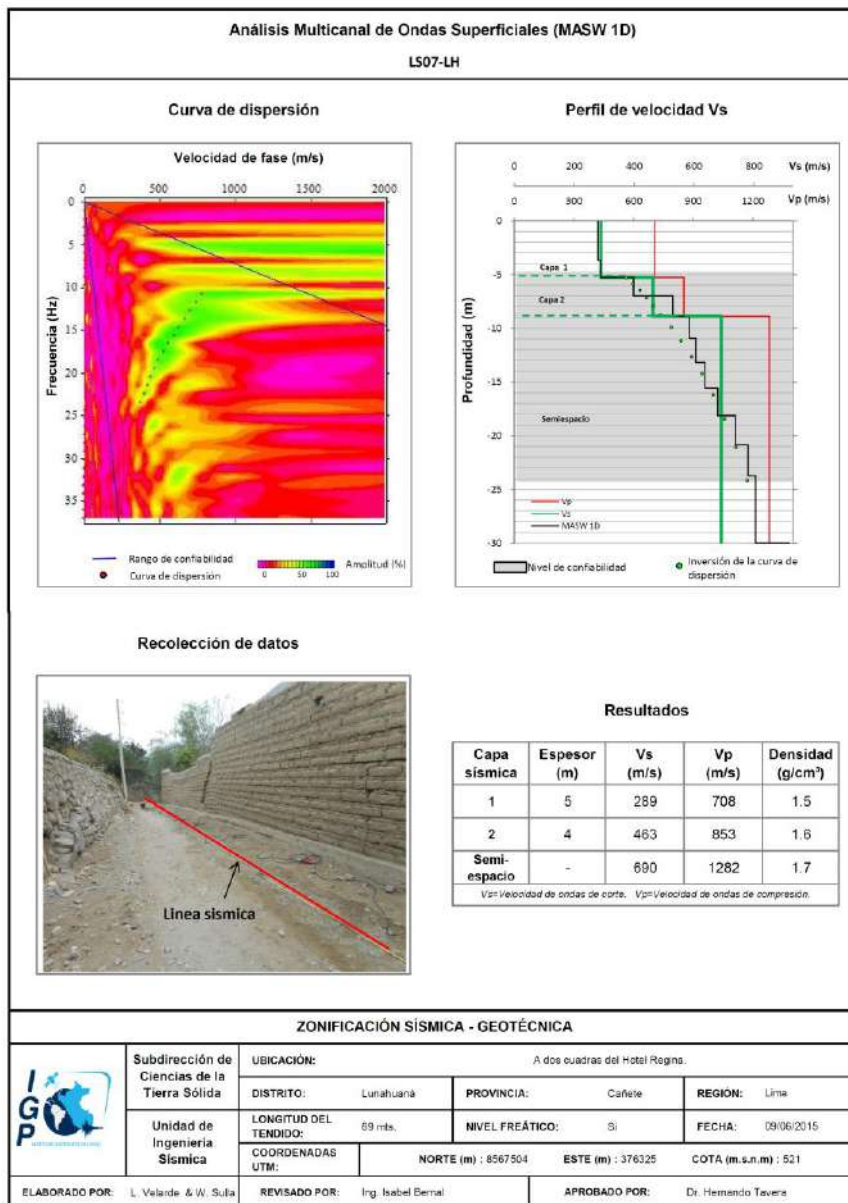


Figura 69.:g) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS07 - LH.

**.- Línea sísmica LS08 - LH:** Realizada a una cuadra del hotel El Molino, extremo norte de la ciudad. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 22 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas. La primera de 2 metros de espesor y Vs de 176 m/s, sugiere suelos blandos, asentada sobre una segunda capa de 7 metros de espesor y Vs de 295 m/s, indica suelos moderadamente duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 515 m/s y sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 69h).

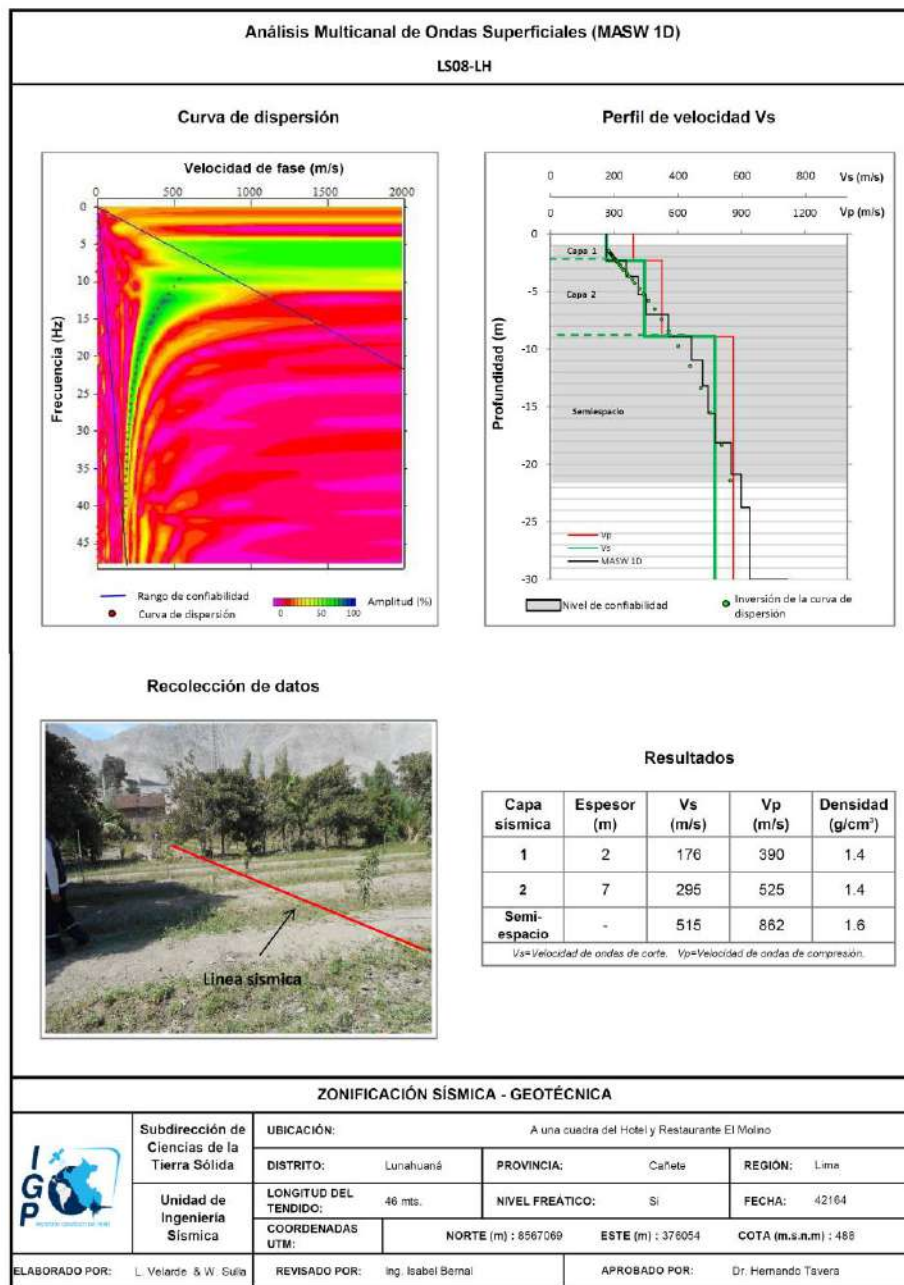


Figura 69 h) Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS08 - LH.

En la Tabla 11, se muestra el resumen del número de capas, espesores y velocidades Vs para cada línea sísmica realizada en la ciudad de Lunahuaná.

Tabla 11. 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-LH	5	383	-	-	562
LS02-LH	2	281	7	399	582
LS03-LH	7	282	4	339	500
LS04-LH	5	240	8	359	502
LS05-LH	7	264	4	403	531
LS06-LH	4	234	9	401	714
LS07-LH	5	289	4	463	690
LS08-LH	2	176	7	295	515
<i>Suelos blandos (Vs &lt; 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>					

Los resultados obtenidos con los sondeos MASW permitieron conocer que los suelos de la ciudad de Lunahuaná, están conformados por una capa de sedimentos superficial con velocidades entre 200 y 290 m/s y espesores de hasta 7 metros seguido por un estrato de gravas areno-limosas con velocidades de entre 300 y 500m/s y espesores que superan los 10 metros. Próximo al río Cañete, la capa superficial presenta velocidades bajas, alrededor de los 180 m/s, y que corresponden a suelos flexibles.

### 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 70 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Lunahuaná. Los resultados indican que en el 95% de la superficie de la ciudad, los suelos responden a periodos menores a 0.3 segundos, siendo en mayor porcentaje del orden de 0.1 s y con amplificaciones mínimas hacia los cerros. Los valores próximos a 0.3 s se encuentran hacia el río Cañete. Al Este de la Carretera principal, los suelos responden a periodos de 0.3 segundo pero con menores amplificaciones y a los alrededores de la plaza de armas, periodos iguales a 0.2 segundos. Sin embargo existe, un segundo rango de periodos que fluctúa entre 0.5 y 1.1 segundos, y a pesar que su amplificación es menor, debe ser considerado a la hora de realizar cualquier obra de ingeniería y/o realizar un estudio en detalle.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Lunahuaná 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 180 m/s y 350 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 10 y 26 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra que los suelos en la ciudad de Lunahuaná son dinámicamente similares, responden a periodos menores e iguales a 0.3 segundos. Estos periodos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por otra de mayor espesor y más profunda, ambos presentan efectos especiales asociados a la dinámica local del subsuelo.

#### **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 Lunahuaná y alrededores se ha realizado 5 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo (Figura 71) y la distribución de 25 electrodos a fin de alcanzar tendidos de 24, 60, 120 y 144 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 10 y 40 metros (Tabla 12).

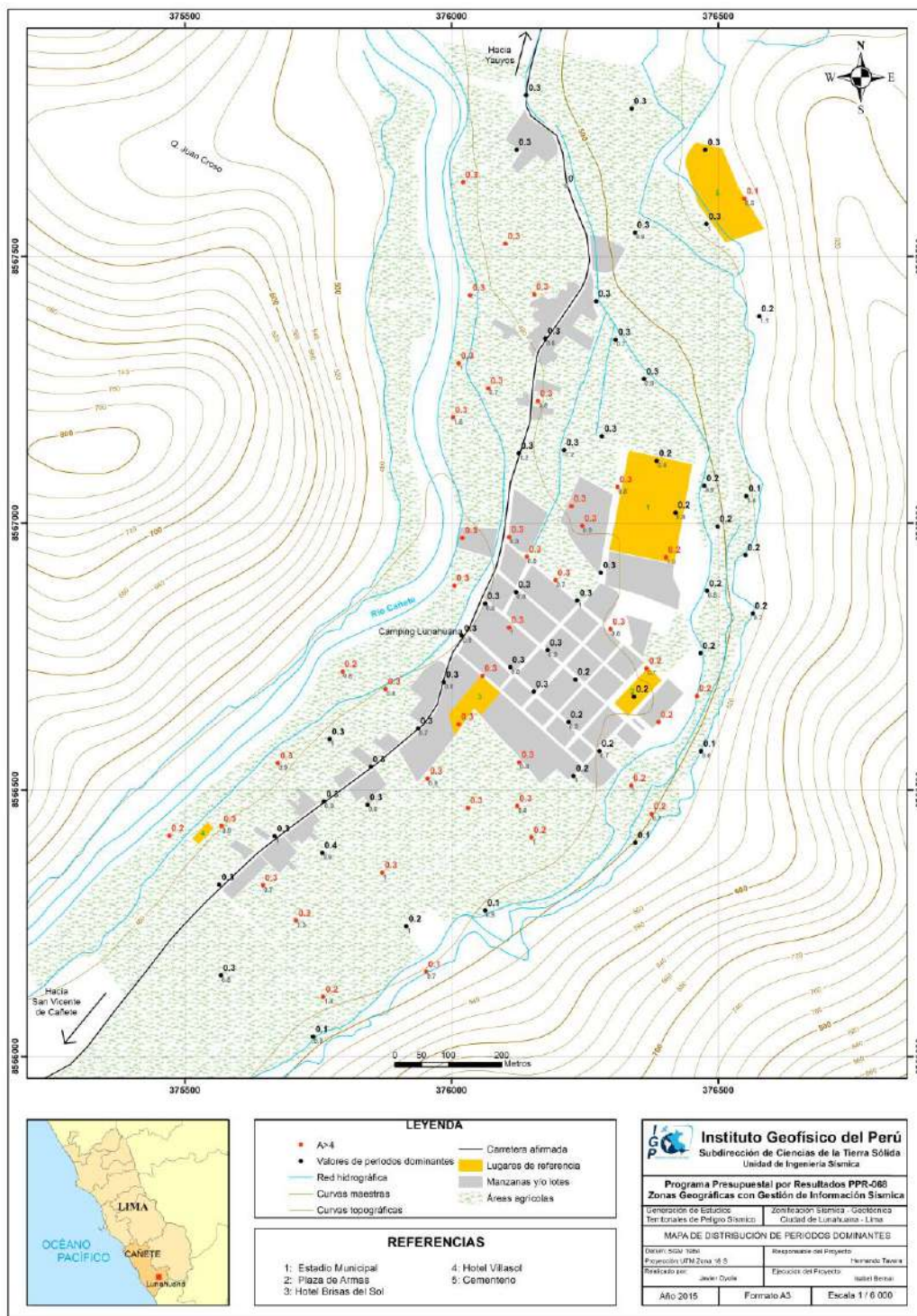


Figura 70: Mapa de la distribución espacial de los valores de periodos dominantes

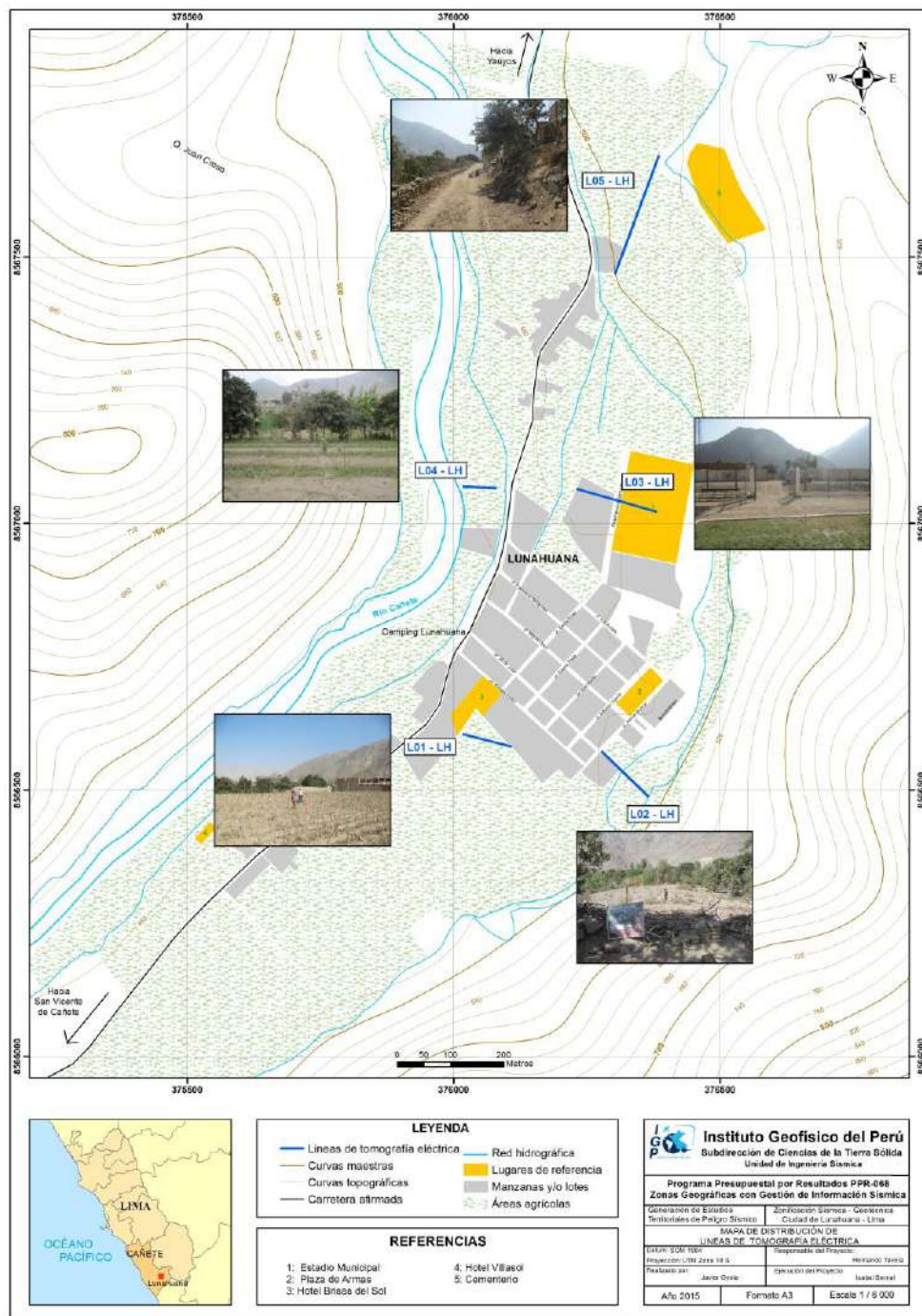


Figura 71: Mapa de la ciudad de Lunahuaná y ubicación de las 6 líneas de tomografía eléctrica codificadas como: LE01-LH, ..., LE05-LH.

A continuación, se describe las características de cada una de las secciones geo-eléctricas realizadas y cuya información permitirá conocer el valor real de la resistividad del subsuelo en la ciudad de Lunahuaná y alrededores (Figura 72).

Tabla 12: Características de las líneas eléctricas.

Nombre de la Línea o sección geo-eléctrica	Separación de Dipolo / Número de electrodos	Extensión de la línea
LE01 – LH	4 m / 25 Electrodos	144 m
LE02 – LH	5 m / 25 Electrodos	120 m
LE03 – LH	6 m / 25 Electrodos	144 m
LE04 – LH	2.5 m / 25 Electrodos	60 m
LE05 – LH	10 m / 25 Electrodos	240

**.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-LH:** Realizada en el cercado, sector suroeste del área urbana de Lunahuaná. El rango de valores de la escala de resistividad varía entre 2 a 2500 ohm.m con el predominio de valores muy altos resistivos y altos resistivos. A lo largo de la línea eléctrica, se distribuyen valores bajos resistivos, entre 2 y 100 ohm.m, a una profundidad promedio de 3 metros, debido a la presencia de terrenos agrícolas. En profundidad (hasta 16 metros), los valores son altos y muy altos resistivos en el orden de 100 a 500 ohm.m y de 500 a 2500 ohm.m respectivamente. Por estar al pie del cerro, los valores se asocian a los afloramientos de rocas intrusivas (Figura 72a). En superficie, los materiales presentes son de grano fino a medio, limos, arena y gravas.

**.- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-LH:** Realizada sobre la ladera este del cerro “Sociedad de San Juan de Lunahuaná”, próximo a la plaza de armas, sector SE del área urbana de Lunahuaná. El rango de valores de la escala de resistividad varía entre 2 a 2500 ohm.m con el predominio de valores bajos resistivos y muy altos resistivos. La línea eléctrica presenta valores muy altos resistivos en el orden de 500 a 2500 ohm.m entre las estaciones 60 y 115, y una profundidad promedio de 6 metros. Entre las estaciones -5 y 60, los valores son bajos resistivos en el orden de 2 y 100 ohm.m, debido a la proximidad de los terrenos agrícolas. A mayor profundidad, se presentan valores muy altos resistivos entre las estaciones 30 y 45 y luego entre las estaciones 55 y 90, asociados a afloramientos de rocas intrusivas como la granodiorita (Figura 72b). En superficie, los materiales presentes son arenas y gravas.

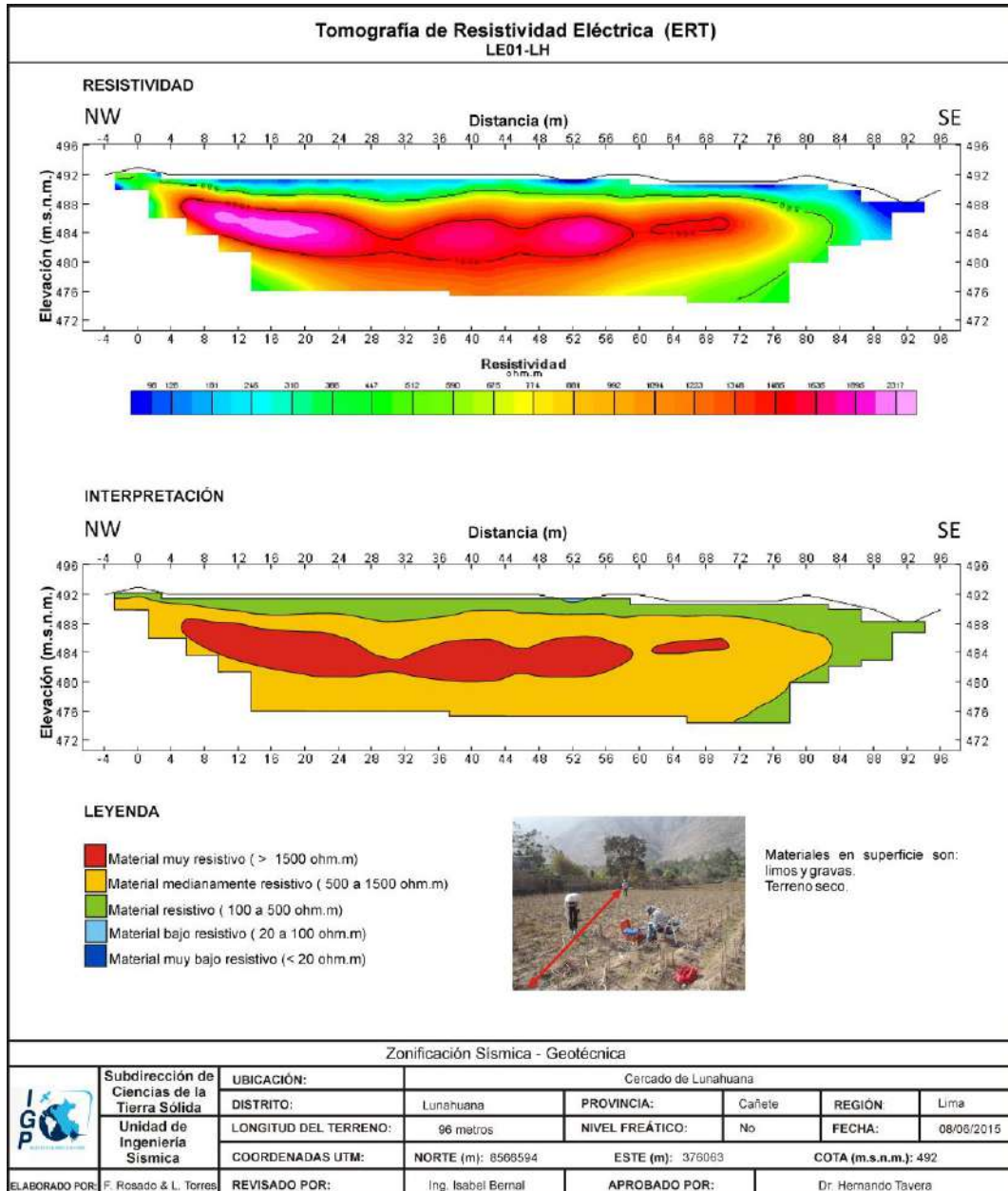


Figura 72ª: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE01-LH.

**.- Línea de tomografía eléctrica LE03-LH:** Realizada en el Estadio de la Universidad Nacional Sánchez Carrión, sector central y este del área urbana de Lunahuaná. El rango de valores de la escala de resistividad varía entre 100 a 2500 ohm.m con el predominio de valores muy altos resistivos y altos resistivos. A lo largo de la línea eléctrica, se distribuyen valores muy altos resistivos, en el orden de 500 y 2500 ohm.m, a una profundidad promedio de 18 metros y entre las estaciones -6 y 60, debido probablemente a la compactación del terreno. A partir de la estación 60, los valores que predominan son los altos resistivos entre 100 a 500 ohm.m. Al final de la línea se tiene la influencia de la vegetación

presente en superficie, ocasionando la saturación de los suelos (Figura 72c). Los materiales presentes en superficie son arena y gravas. La parte final de la línea fue tomada sobre el césped del estadio.

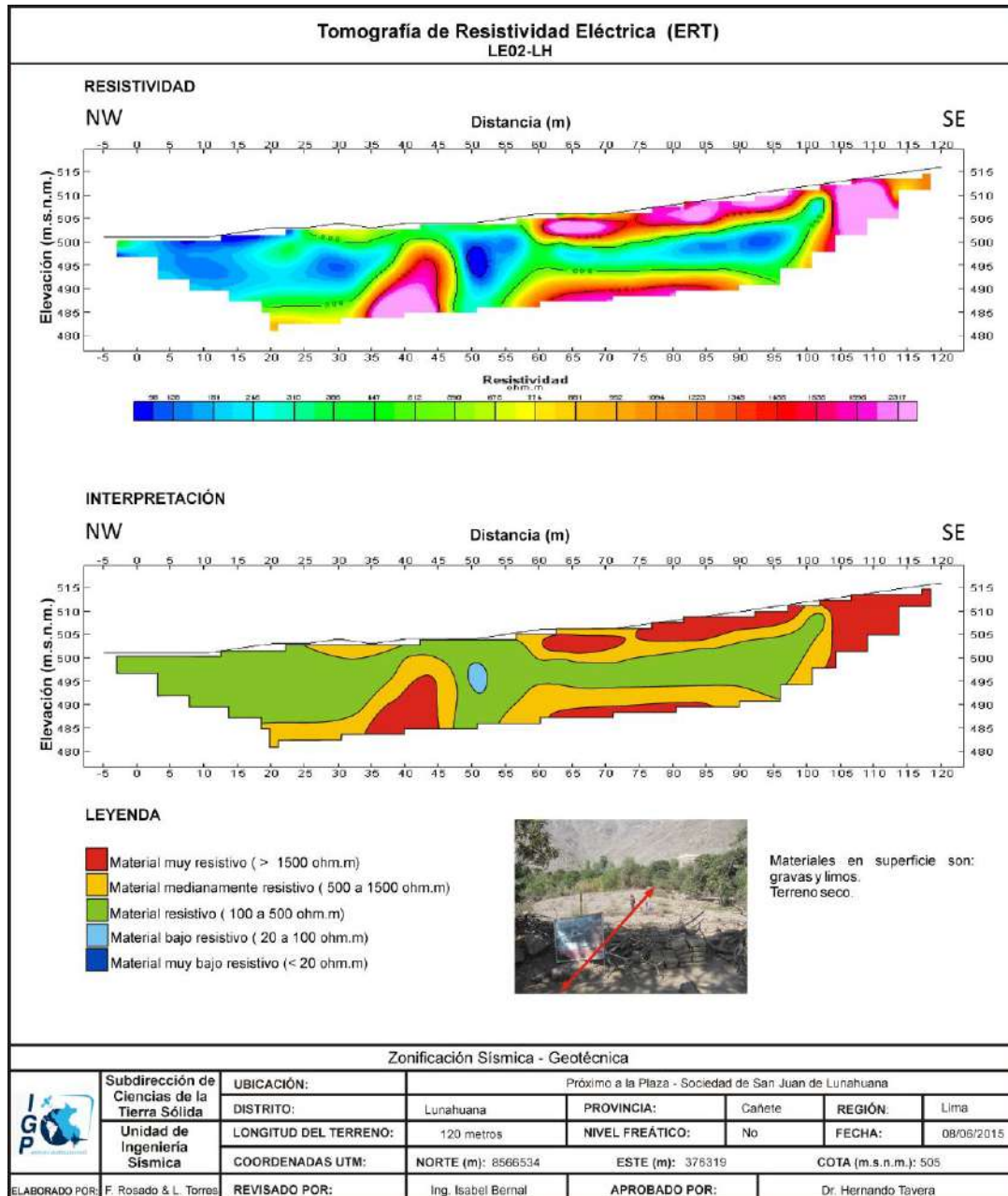


Figura 72b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE02-LH.

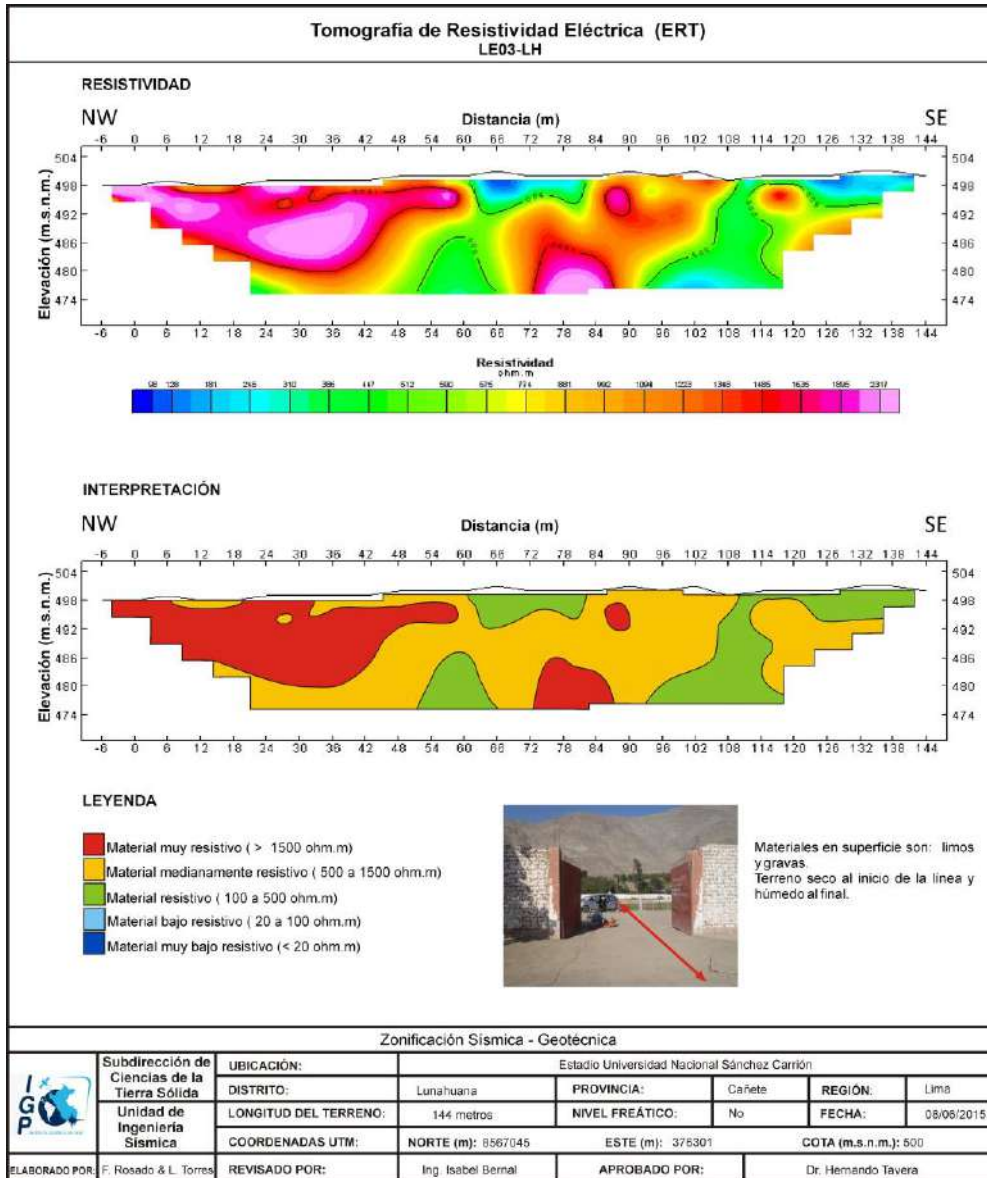


Figura 72c. Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE03-LH.

**- Línea de tomografía eléctrica LE04-LH:** Realizada en la zona conocida como “El Molino”, perpendicular al río Cañete, sector central y hacia el oeste del área urbana de Lunahuaná. El rango de valores de la escala de resistividad varía desde 2 a 2500  $\Omega\text{m.m}$  con el predominio de valores altos resistivos. A lo largo de la línea eléctrica, se distribuyen valores bajos resistivos en el orden de 2 y 100  $\Omega\text{m.m}$ , en la parte superficial del perfil y a una profundidad promedio de 2 metros desde la estación 25 hacia el extremo Este de la línea, lo cual puede ser debido a la presencia de terrenos agrícola y a la proximidad con el río Cañete. Debajo de estos valores se presentan otros altos y muy altos resistivos en el

orden de 100 a 500 ohm.m y de 500 a 2500 ohm.m respectivamente. Estos tienen forma alargada entre las estaciones 15 y 25 y posteriormente, desde la estación 40 hacia el final de la línea tomando la forma de una elipse alargada (Figura 72d). Los materiales presentes en superficie son de grano fino a medio, limos, arena y gravas. Son terrenos de cultivo que están por debajo del nivel de la carretera asfaltada.

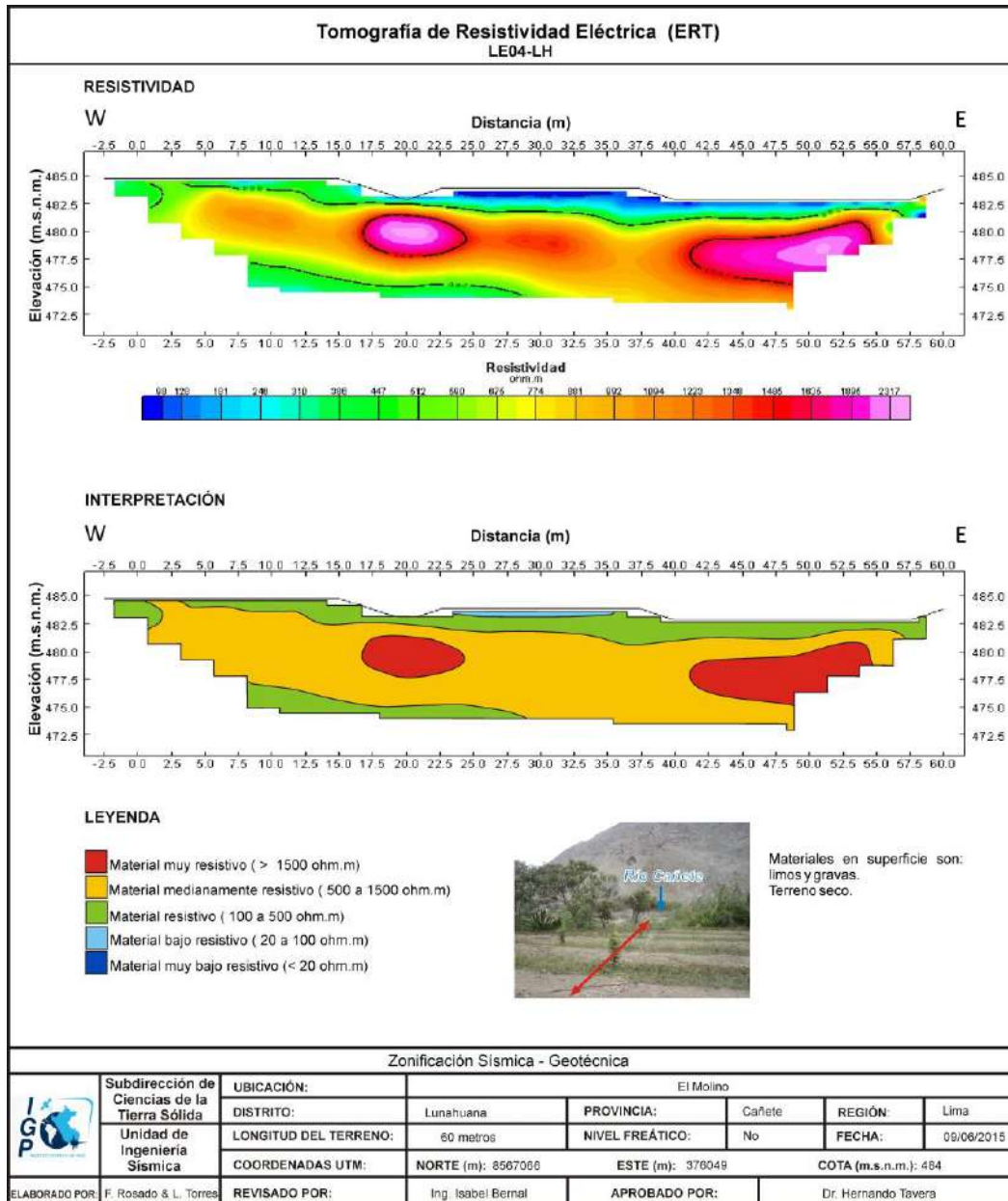


Figura 72d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE04-LH.

**.- Línea de tomografía eléctrica LE05-LH:** Realizada sobre la calle Camino Real, próximo al cementerio, sector NE del área urbana de Lunahuaná. El rango de valores de la escala de resistividad varía desde 2 a 2500 ohm.m con el predominio de valores muy bajos resistivos y bajos resistivos. A lo largo de la línea eléctrica se distribuyen valores bajos resistivos (100 y 500 ohm.m) y muy bajos resistivos (100 ohm.m), todos a profundidades variables, siendo asociados a la presencia de un canal de agua y a la existencia de terrenos agrícolas alrededor de la línea. También se presentan valores muy altos resistivos con valores superiores a 1500 ohm.m, asociados a terrenos compactados. Por encontrarse esta línea en la ladera del cerro podría corresponder a afloramientos de rocas intrusivas (Figura 72e). Los materiales presentes en superficie son de grano fino a medio, limos, arena y gravas.

La distribución de los valores de resistividad, evidencia la presencia de zonas con valores altos resistivos asociados a afloramientos de granodiorita (extremo Este) y otras con valores bajos resistivos que corresponderían a suelos saturados por la influencia del río Cañete (extremo Oeste). Hacia, el extremo norte del área urbana de Lunahuaná, se evidencia la presencia de zonas con alto nivel freático, debido a la presencia de terrenos de cultivo y canales de agua que contribuyen a la saturación del medio. A profundidades, mayores a los 10 metros, se observa estratos más resistivos, asociados a suelos compactados o afloramientos de rocas ígneas intrusivas.

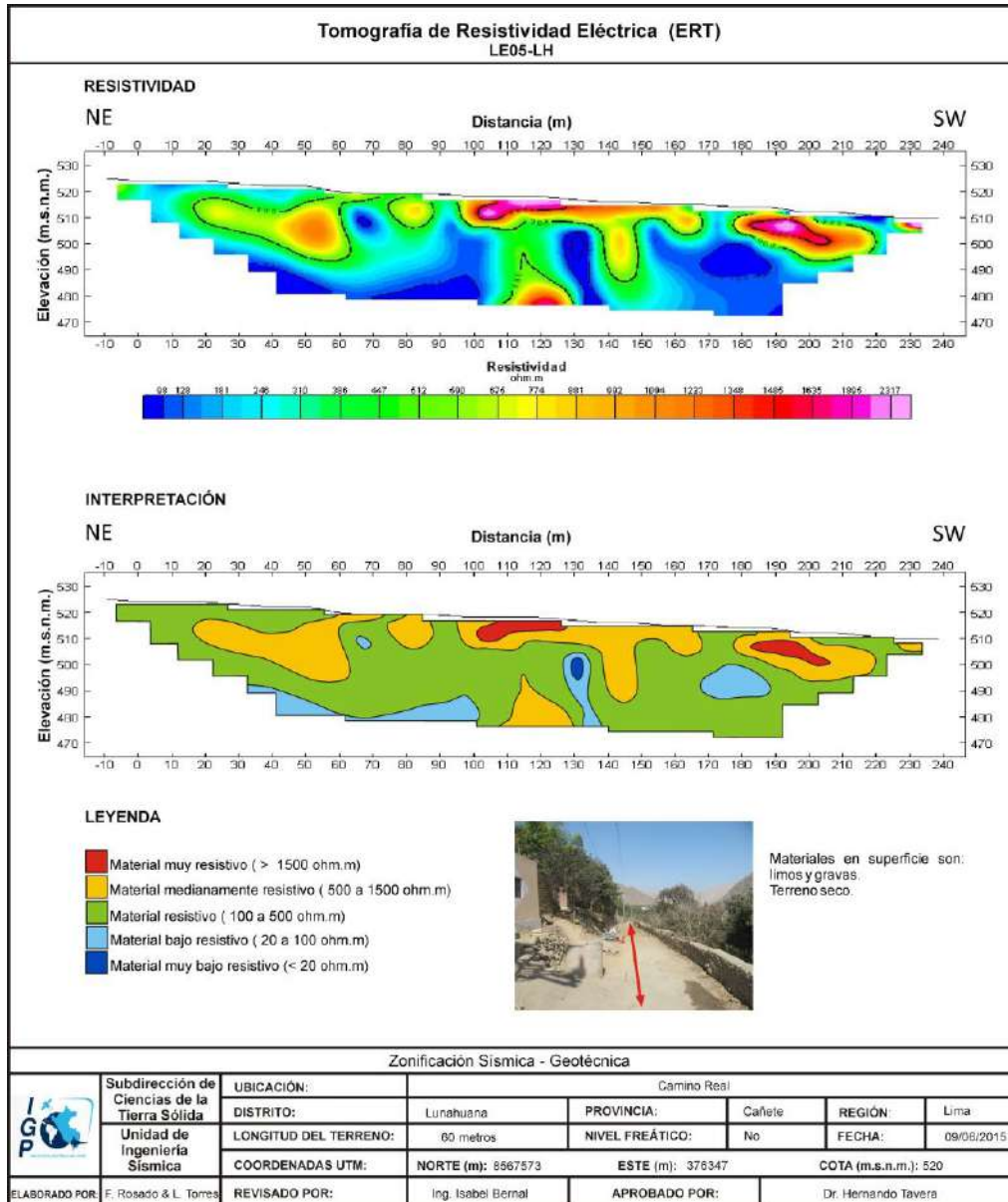


Figura 72e. Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método de tomografía eléctrica para la línea LE05-LH.

## 12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Lunahuaná y alrededores considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Lunahuaná, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de dos tipos de suelos: Tipo S1 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

### 12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Lunahuaná se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 73):

*.- **ZONA I:** Conformada por estratos de grava areno-limosa que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene 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. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) del orden de 400m/s y suelos con capacidad portante de media a alta ( $>3.0 \text{ kg/cm}^2$ ). Dentro de esta zona se observa claramente que los periodos de 0.1 y 0.2 segundos se agrupan hacia las zonas más altas, además de la plaza de Armas. Los periodos de 0.3 segundos están presentes hacia la zona céntrica de la ciudad. Asimismo, esta zona muestra sensibilidad en periodos que fluctúan de entre 0.7 y 1.0 segundos.*

*.- **ZONA IV:** Conformada por depósitos fluviales areno-limosos, con alto nivel freático. El comportamiento dinámico de los suelos ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la Norma Sismorresistente peruana y corresponde a un caso especial y/o condiciones excepcionales.*

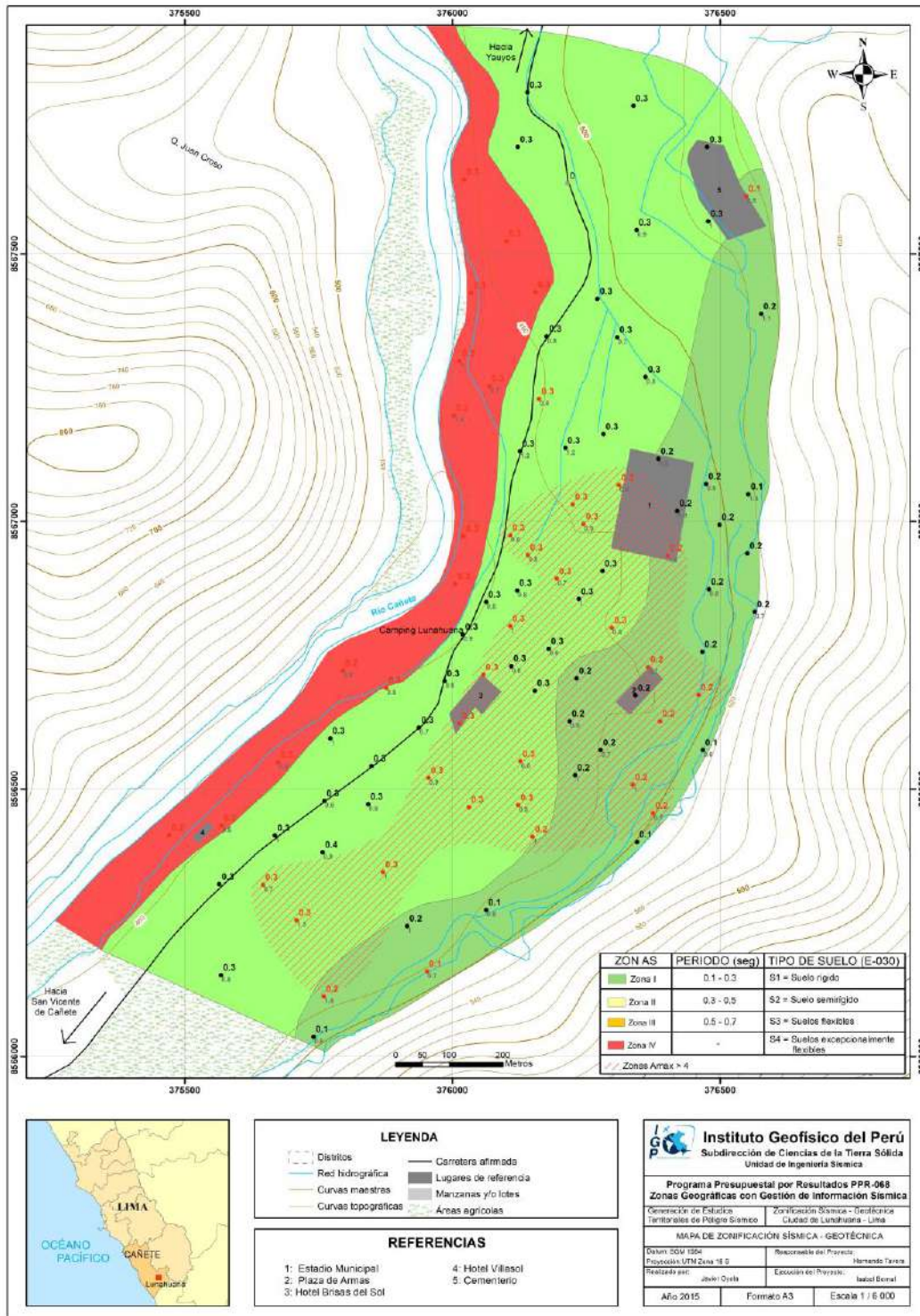


Figura 73: Mapa de zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Lunahuaná y alrededores

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

### CONCLUSIONES

La ciudad de Lunahuaná (aproximadamente el 95% de su superficie), se asienta sobre una terraza aluvial conformada por materiales heterogéneos (clastos sub angulosos a redondeados). La superficie restante corresponde a un abanico aluvial (Barrio Santa Rosa). En los alrededores, se han identificado la presencia de montañas, abanicos aluviales, lechos fluviales y torrenteras libres de ocupación urbana.

En la ciudad se ha identificado 2 tipos de eventos geodinámicos: Flujos de detritos y caídas de rocas. Los primeros discurren por la torrentera Jita (canalizada) y Torrentera del Barrio Santa Rosa, ambas al margen izquierdo del río Cañete en dirección oeste de la Plaza Central (Lunahuaná). En la torrentera del Barrio Santa Rosa se determinó que el umbral de precipitación para producirse un flujo es de 23.7 mm de acumulado mensual.

La caída de rocas se produce en las laderas de los cerros que rodean a la ciudad de Lunahuaná, tanto a la margen izquierda y derecha del río Cañete. Sin embargo, las que afectan directamente a la infraestructura son las que descienden del cerro ubicado al lado de la av. Cementerio, estas llegan a medir 1.00 m de diámetro aproximadamente y obstaculizan el paso de vehículos.

Se debe tener en cuenta que en las calicatas desarrolladas en la ciudad de Lunahuaná no se evidencio la presencia de nivel freático superficial

Las zonas urbanizadas se encuentran alejadas del cauce del rio Cañete (más de 100 metros) y considerando que este tiene un cauce definido y profundo, se estima que el peligro por inundación en estas zonas es bajo.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Lunahuaná ha permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de suelos Tipo S1 y S4; es decir, suelos medianamente rígidos y excepcionales.

## **RECOMENDACIONES**

Para evitar la erosión en ambos márgenes de la torrentera ubicada en el barrio Santa Rosa, así como el desborde del flujo por la misma, se recomienda canalizar la torrentera. Para el caso de caída de bloques de piedras, se recomienda colocar mallas dinámicas de protección de triple torsión a lo largo de la av. Cementerio

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

## 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 – México. Tesis de Maestría, II-UNAM, México.
- 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/inventariovial/default2.aspx>
- 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 relations between seismic fault parameters and momento magnitude of earthquakes. *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. & Landa T. César (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.
- UNICA-INDECI (2012)-"Mapa de Peligros, Plan de Usos del Suelo y Propuestas de Medidas de Mitigación de los Efectos producidos por los Desastres Naturales de las Ciudades de la Provincia de Cañete.
- Varnes D.J. (1958). "Landslides types and processes". Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.
- Varnes D.J. (1978). "Slope movement types and processes". Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Young, R., S. Chiou, W. Silva, J. Humphrey (1997): Strong Ground Motion Attenuation Relationship for subduction zone earthquakes. *Seism. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.

## MAPAS



Centro Nacional de Monitoreo Sísmico - Acelerométrico

## **DIRECCIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA SOLIDA**

Calle Calatrava 216 – Urb. Camino Real – La Molina

Teléfono: 3172300 (140)