

## 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 CASMA

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima - Perú

2016

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

Provincia de Casma - Departamento de Ancash  
(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

Segundo Ortiz

Kelly Pari

Christian Chiroque

Liliana Torres

Roberth Carillo

Fabiola Rosado

Mariana Vivanco

Lizbeth Velarde

Pilar Vivanco

Luz Arredondo

Héctor Lavado

Javier Oyola

Julio Lara

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 del área urbana de la ciudad de Casma, capital de la provincia de Casma, departamento de Ancash. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.*

*Los resultados obtenidos para la ciudad de Casma han permitido identificar, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de tres zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.*

*El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para el área urbana de la ciudad de Casma 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, este documento técnico debe constituirse 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.- LA CIUDAD DE HUARAL

##### 3.1.- Clima

#### 4.- ANTECEDENTES

##### 4.1.- Estudios previos

#### 5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

#### 6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

#### 7.- METODOLOGÍA

##### 7.1.- Estudios de sismicidad

##### 7.2.- Estudios de peligro sísmico

##### 7.3.- Estudios geológicos y geotécnicos

##### 7.4.- Estudios sísmicos y geofísicos

#### 8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

##### 8.1.- Sismicidad

##### 8.2.- Peligro Sísmico

#### 9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

##### 9.1.- Geomorfología

##### 9.1.1.- Unidades geomorfológicas

##### 9.1.1.1.- Origen denudacional

##### 9.1.1.2.- Origen depositacional

##### 9.2.- Geología

##### 9.2.1.- Geología regional

##### 9.2.2.- Geología local

### 9.3.- Geodinámica

#### 9.3.1.- Inundaciones

##### 9.3.1.1.- Modelamiento numérico

## 10.- GEOTÉCNIA

### 10.1.- Clasificación de suelos SUCS

### 10.2.- Ensayo de corte directo

### 10.3.- Capacidad de carga admisible

### 10.4.- Análisis de elementos expuestos

#### 10.4.1.- Primeros asentamientos y eventos pasados

## 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 ensayos de DPL

ANEXO 4: Fichas de posteo

ANEXO 5: Fichas de eventos granulometría

ANEXO 6: Mapas formato A3

**NOTA:** La base de datos de campo, la información procesada y material fotográfico puede ser solicitado a la Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida 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, Geodinámica Superficial y Sismología 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 calidad de las construcciones y la educación de la población.

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, 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 tipo de suelos identificados en la zona de 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 Casma, capital de la provincia de Casma, departamento de Ancash (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades locales y regionales dispongan de un documento técnico que les ayude en la toma de decisiones para el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo de desastres ante la ocurrencia de 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 Casma*

### 3.- DISTRITO Y CIUDAD DE CASMA

La provincia de Casma es una de las veinte que conforman el departamento de Áncash y limita al Norte con la provincia del Santa, al Este con las provincias de Yungay y Huaraz, al Sur con la provincia de Huarvey y al Oeste con el Océano Pacífico. Asimismo, el distrito de Casma es uno de los cuatro que conforman la provincia de Casma, siendo la ciudad del mismo nombre la capital de la provincia. La ciudad de Casma se encuentra ubicada en la parte baja del valle que forma el río del mismo nombre. Esta ciudad tiene aproximadamente 28,880 habitantes, siendo fundada el 22 de julio de 1751.

En sus inicios, Casma era parte del imperio Gran Chimú y posteriormente, después de muchas batallas fue parte de las conquistas del imperio incaico, aunque debido a su ímpetu como guerreros fueron respetados por los incas. Luego los incas, en oposición a su política con las regiones conquistadas, dejaron decaer los poblados Chimú, y Casma no escapó a esta dura ley de vencedor. Sin embargo, el historiador Juan I. Reyna, indica que Casma fue destruida por terremotos y aluviones, lo que parece tener fuerza, pues a lo largo del tiempo el valle ha sufrido innumerables desastres producidos por las crecientes del río que lleva su nombre. Por otro lado, fueron los incas quienes dejaron en Casma la ruta del gran camino costero y cuya traza puede ser seguida aún, así como la ruta de Casma al Callejón de Huaylas, pasando por Quillo y Matacoto, ruta aún usada por los lugareños.

En términos generales, los incas conquistaron al reino Chimú y a su vez los españoles conquistaron a los incas. Ya durante la colonia el puerto de Casma fue uno de los más importantes y ello permitió que a fines del siglo XVI e inicios del XVII, en los territorios actuales existieron dos pueblos y/o caseríos: Casma La Alta y Casma La Baja. Por otro lado, el 23 de marzo de 1857, Don Ramón Castilla, promulga una ley que establece en artículo único: “La capital de la provincia de Santa será Casma con el título de Villa”, que consideraba a Casma como el punto céntrico de la provincia de Santa, el más inmediato a la capital del departamento y que concentraba el comercio, las importaciones y exportaciones realizadas por Puerto Casma. Algunas fechas importantes son:

- El 31 de octubre de 1870 se crea el distrito de Yaután.

- El 11 de octubre de 1909, se eleva a la categoría de ciudad la Villa de Casma.
- El 3 de mayo de 1926 se crea el distrito de Comandante Noel mediante ley N° 5444, promulgada por Augusto B. Leguía, con su capital Puerto de Casma.

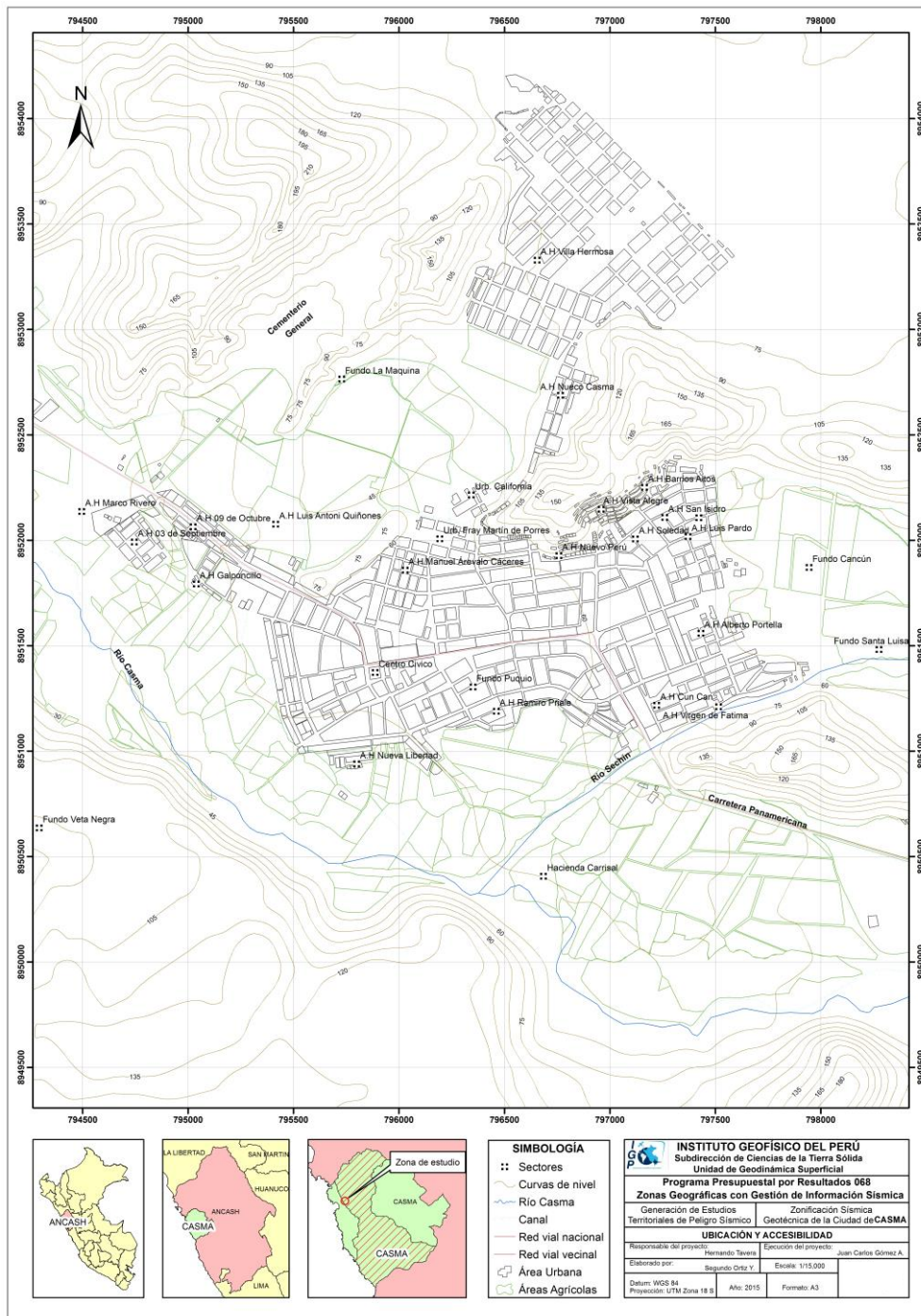


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Casma

- El 5 de abril de 1935, el presidente Oscar R. Benavides crea el distrito de Buenavista Alta, mediante Ley 8075.

- El 14 de abril de 1950 se divide la antigua y extensa provincia del Santa en dos provincias, mediante Decreto Ley N° 11326; la provincia del Santa con su capital Chimbote y la provincia de Huarmey con su capital Casma.

- El 25 de julio de 1955 cuando el general Odría promulga la ley N° 12382, que cambia de nombre a la provincia de Huarmey por la de Casma con su capital Casma, constituyéndose el 25 de julio como fecha de creación de la provincia de Casma.

- El 20 de diciembre de 1984 se crea la provincia de Huarmey (Ley 24034), desmembrándose de la provincia de Casma, quedando con los cuatro distritos actuales.

Finalmente, Casma tiene como centros poblados a Carrizal, San Rafael, San Francisco, Choloque, Calaveras, Nivin, Casa Blanca, Mojeque, Purgatorio y La Gramita.

### **3.1.- Clima**

Para determinar las condiciones climáticas en la ciudad de Casma, se han tomado datos referenciales de la Web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación meteorológica Buena Vista se encuentra ubicada a 12.4 km al NE de la ciudad y según información registrada en esta estación (período 2010 – 2015), el clima en la ciudad es cálido y seco. Esta estación registra una temperatura media mensual, que durante los meses de verano, oscila entre 31 °C y 32.94 °C; mientras que, el mes más frío, agosto las temperaturas son en promedio de 13.02 °C.

#### 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 uno de los causantes directos 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.

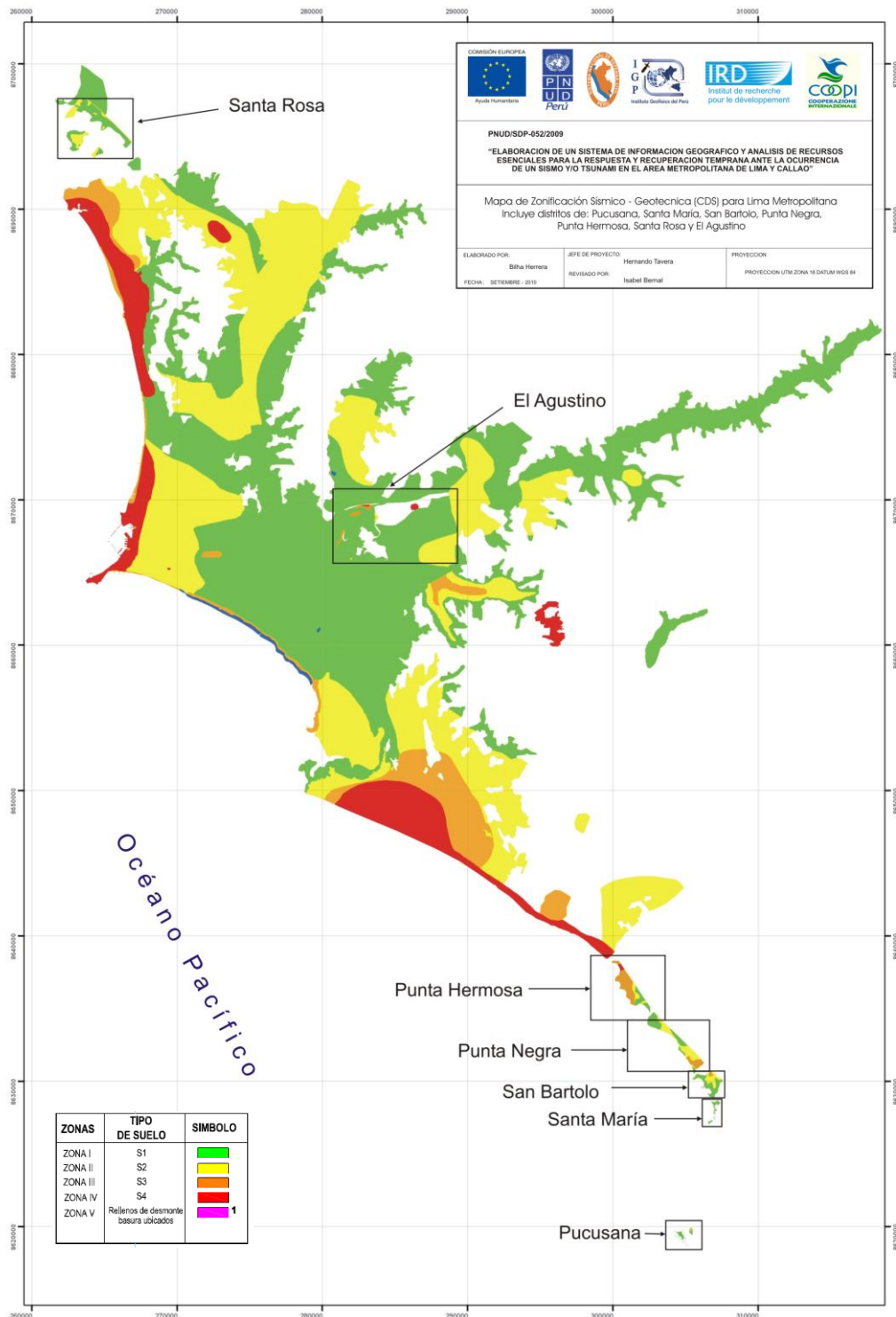


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y como parte del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica en las áreas urbanas de Chosica, Chaclacayo, Huaycán y Carapongo, todos ubicados en el departamento de Lima. En el año 2013, los estudios son realizados en las ciudades de Chimbote y Huarmey del departamento de Ancash; además de Barranca y Huacho del departamento de Lima. En el año 2014, estudios similares son realizados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca, Chala, Camaná, Arequipa, Punta de Bombón y Cocahacra, todas ubicadas en el departamento de Arequipa.

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

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

Para la ciudad de Casma, se ha recopilado información sobre estudios previos de geología, geotécnica, sísmica y geofísica realizados por diversos investigadores e instituciones a fin de ser considerada para proyectar los objetivos del presente estudio, además de complementar los resultados a obtenerse. Entre los principales documentos técnicos consultados, se tiene:

**Ministerio de Agricultura (2007): Estudio hidrológico en la Cuenca del río Casma.** En este documento se indica que el río Casma pertenece al sistema hidrográfico de la vertiente del Océano Pacífico, presenta una extensión de 2990.7 km<sup>2</sup>, y que su curso principal recorre 107,026 km con rumbo predominante E-O.

**Sánchez, A. (1995): Geología de cuadrángulos de Chimbote, Casma y Culebras, Boletín 59, serie A.** En el estudio se determina que la ciudad de Casma se encuentra asentada sobre depósitos aluviales y rodeados en sus extremos norte y sur, por afloramientos de rocas intrusivas de tipo tonalitas.

## 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, geodinámicos, geotécnicos, sísmicos y geofísicos (Figura 4a, b). 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, dependiendo de cada área de estudio, son los relacionados a tsunamis, inundación por crecida de los ríos y licuación de suelos. Estos escenarios son frecuentes en ciudades ubicadas en zonas costeras y otras en las regiones andinas y subandinas, próximos a zonas de alta pendiente y/o entorno a las riberas de ríos.



Figura 4a: Rio Sechín bordeado por llanuras de inundación en épocas de crecida del río

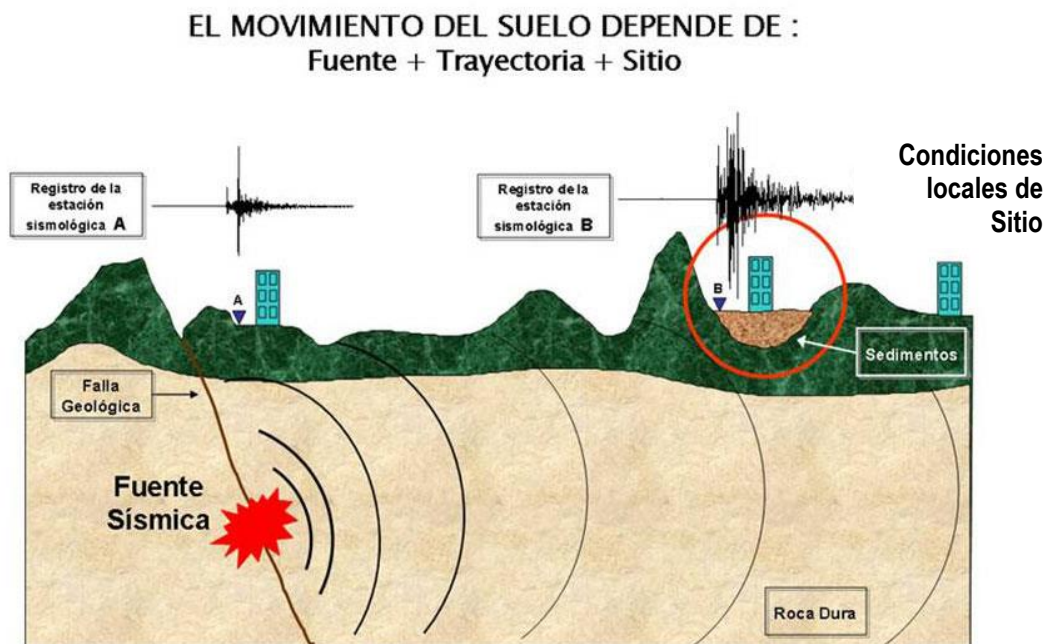


Figura 4b: Las condiciones locales de sitio controlan la amplificación del sacudimiento del suelo, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos.

## 6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

En el 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. 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 500 y 1500 m/s.*

***.-Suelos intermedios (Tipo S2).** Suelos con características intermedias entre las indicadas para los suelos S1 y S3.*

***.-Suelos flexibles o con estratos de gran espesor (Tipo S3).** Corresponden a suelos que presentan velocidades de ondas de corte menor e igual a 180m/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 Norma E.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 1500m/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 500m/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 0.7 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 180m/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 E.030, 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 Casma 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**

Para conocer las características de la sismicidad en la región en donde se encuentra la ciudad de Casma, se hace uso del catálogo y Mapa Sísmico del Perú (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 de profundidad. El objetivo es extraer muestras de suelo para realizar dos tipos de análisis, el primero considera 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).



Figura 5: Calicata elaborada en la ciudad de Casma con el apoyo de la municipalidad. Extracción de muestras para conocer, por ejemplo, la densidad del suelo mediante el método del cono de arena.

**- 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, a mayor compactación, mayor será la resistencia a la deformación.

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

.- **Ensayo de penetración dinámica ligera – DPL** (Norma DIN4094): Consiste en un equipo de campo y registro continuo sobre el número de golpes necesarios para hacer penetrar un tramo de varillaje a lo largo de todo el ensayo. Permite estimar la resistencia del material (suelo) al hincado del cono dinámico. En este caso, la exploración solo es aplicable en terrenos arenosos, arcillosos y limo – arcillosos (Figura 6).



Figura 6: 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.

.- **Técnica 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 7).



Figura 7: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales en la ciudad de Casma: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 8, 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 CA-93 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CA-139, presenta diversidad de pulsos de ruido transitorio de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 9), 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.

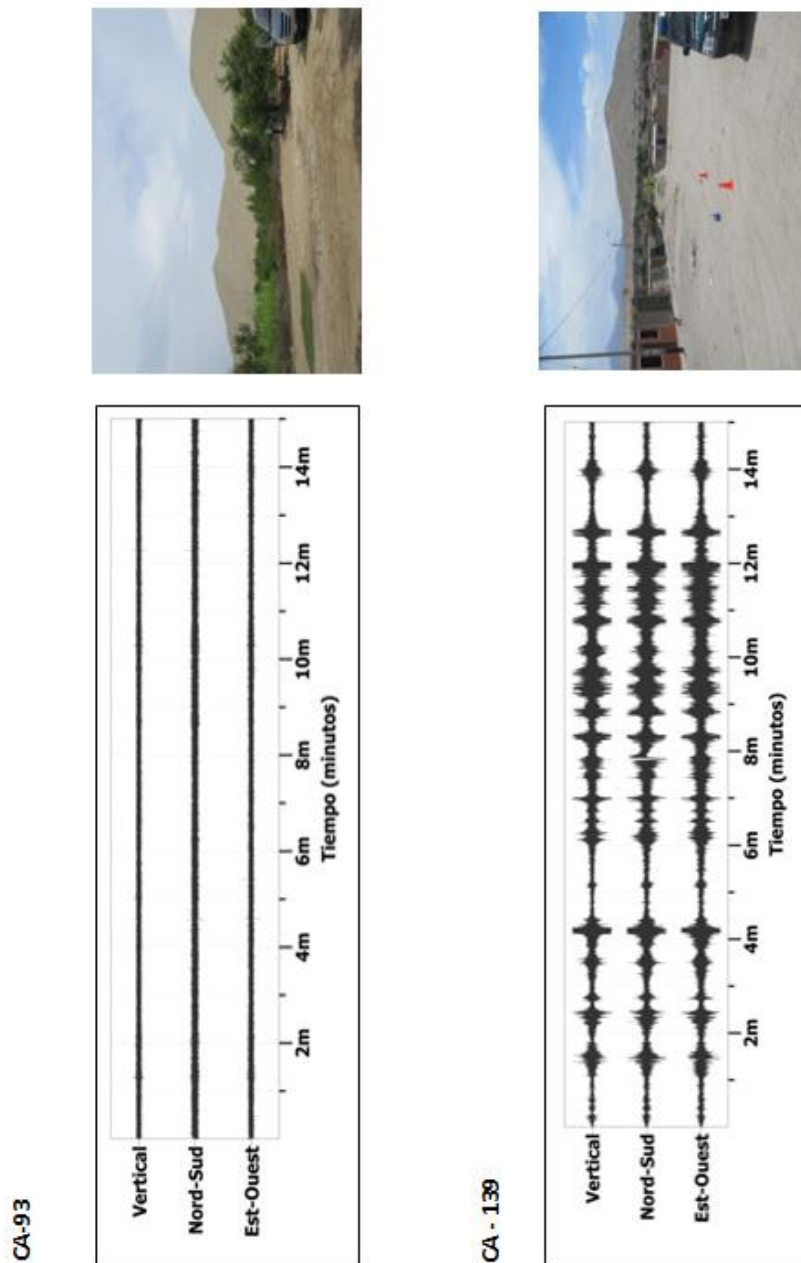


Figura 8: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (CA-93) y otro con ruido transitorio (CA-139). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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

- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.

- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- . Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar. Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

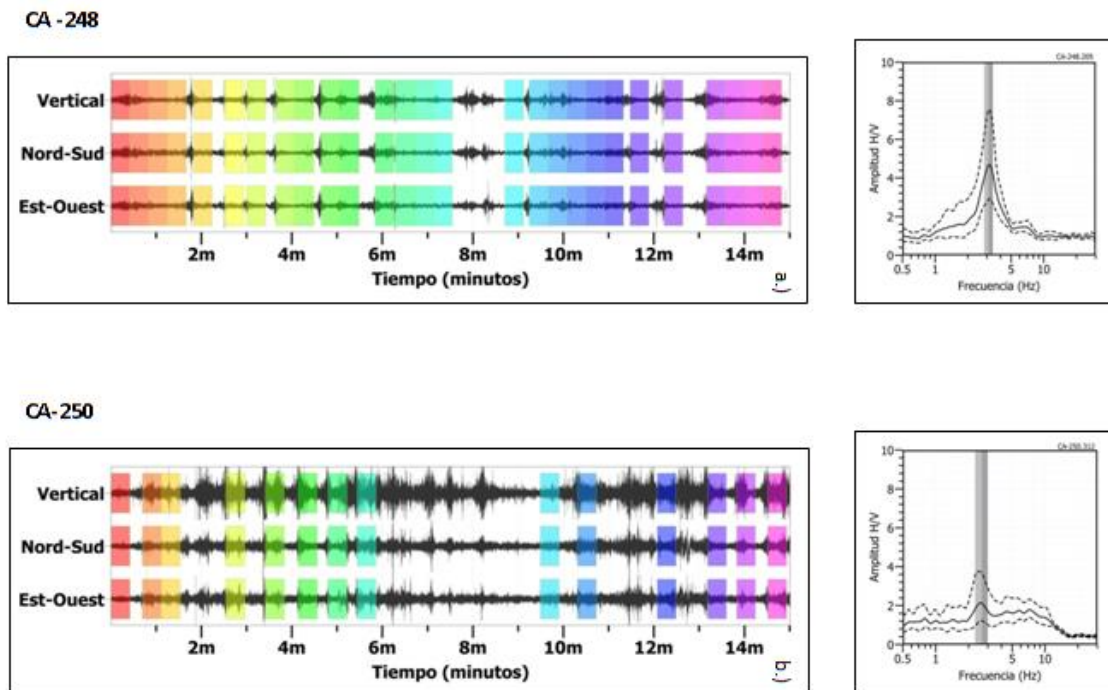


Figura 9: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. CA-248: Registros y razón H/V donde se identifica la presencia de un pulso de frecuencia predominante de moderada amplitud. CA-250: Registros y razón H/V en el cual se observa que existe un pico de frecuencias predominante de baja amplitud. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

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

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

.- **Método de arreglos lineales:** Se hace uso de tendidos lineales de 24 sensores sísmicos a fin de registrar ondas de volumen y superficiales generadas por fuentes artificiales. 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 10).

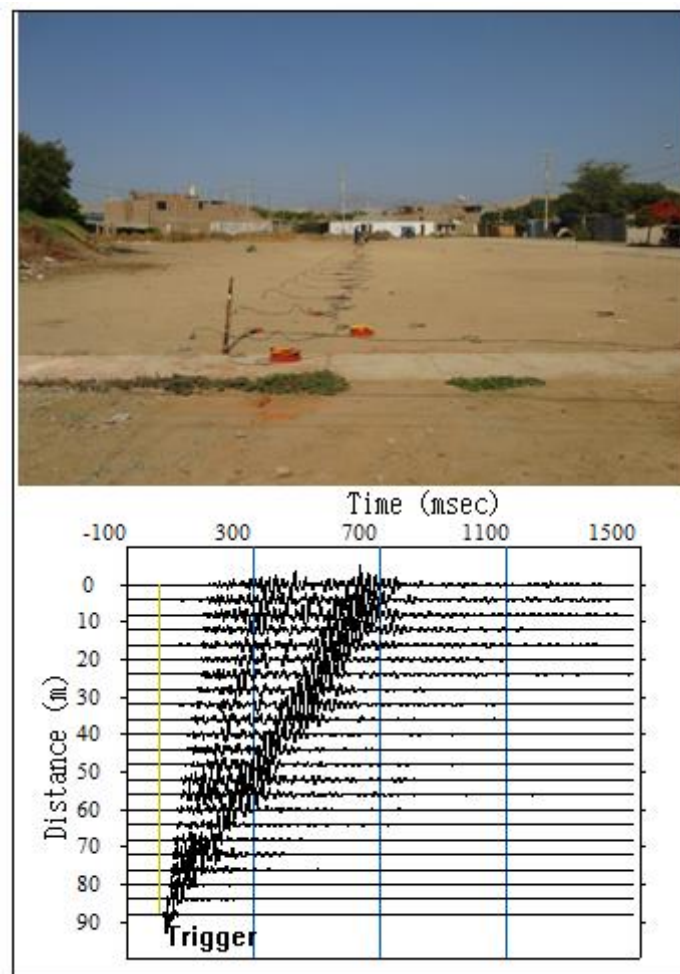


Figura 10: Disposición del equipo de refracción sísmica y trazas obtenidas en la ciudad de Casma

La aplicación de esta técnica permite determinar las características físicas del subsuelo de manera indirecta, basándose en el comportamiento de las ondas sísmicas al pasar por distintos medios, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte ( $V_s$ ) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la

información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte ( $V_s$ ) para el punto medio de cada línea de estudio. La aplicación de un nuevo cálculo iterativo inverso, permite conocer el periodo predominante teórico correspondiente al perfil de velocidades, el cual es correlacionado con el obtenido con la técnica H/V a fin de validar ambos resultados.

.- **Método de prospección eléctrica:** Tiene por objetivo determinar la distribución real del parámetro resistividad del subsuelo hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida. Para ello se considera los valores de resistividad aparente obtenidos mediante medidas realizadas por métodos convencionales de corriente continua. En este estudio se considera solo los perfiles realizados en la superficie del terreno (Figura 11).



Figura 11: Disposición del equipo de prospección eléctrica en la ciudad de Casma

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, Vp: 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.

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. Un factor importante a señalar es que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua; sin embargo, 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 estos están referidos a suelos con presencia de agua, material orgánico, arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 Ohm.m., equivalente al agua de mar.*

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

## 8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

La ciudad de Casma se encuentra ubicada 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 tengan áreas extensas de percepción y por ende, de daños y destrucción. 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 que se consideren para el desarrollo urbanístico de la ciudad y/o obras de ingeniería.

### 8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región central presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras, y una de estas ciudades es Casma (Figura 12).

Según información histórica, los sismos que causaron daño y destrucción en Casma 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-Huaral 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 del total de muertos en Cañete, Chancay y Pisco, sobre todo en este último lugar, que también fue inundado totalmente por el mar, a punto tal que después hubo de trasladarse y refundarse a una legua del mar.*

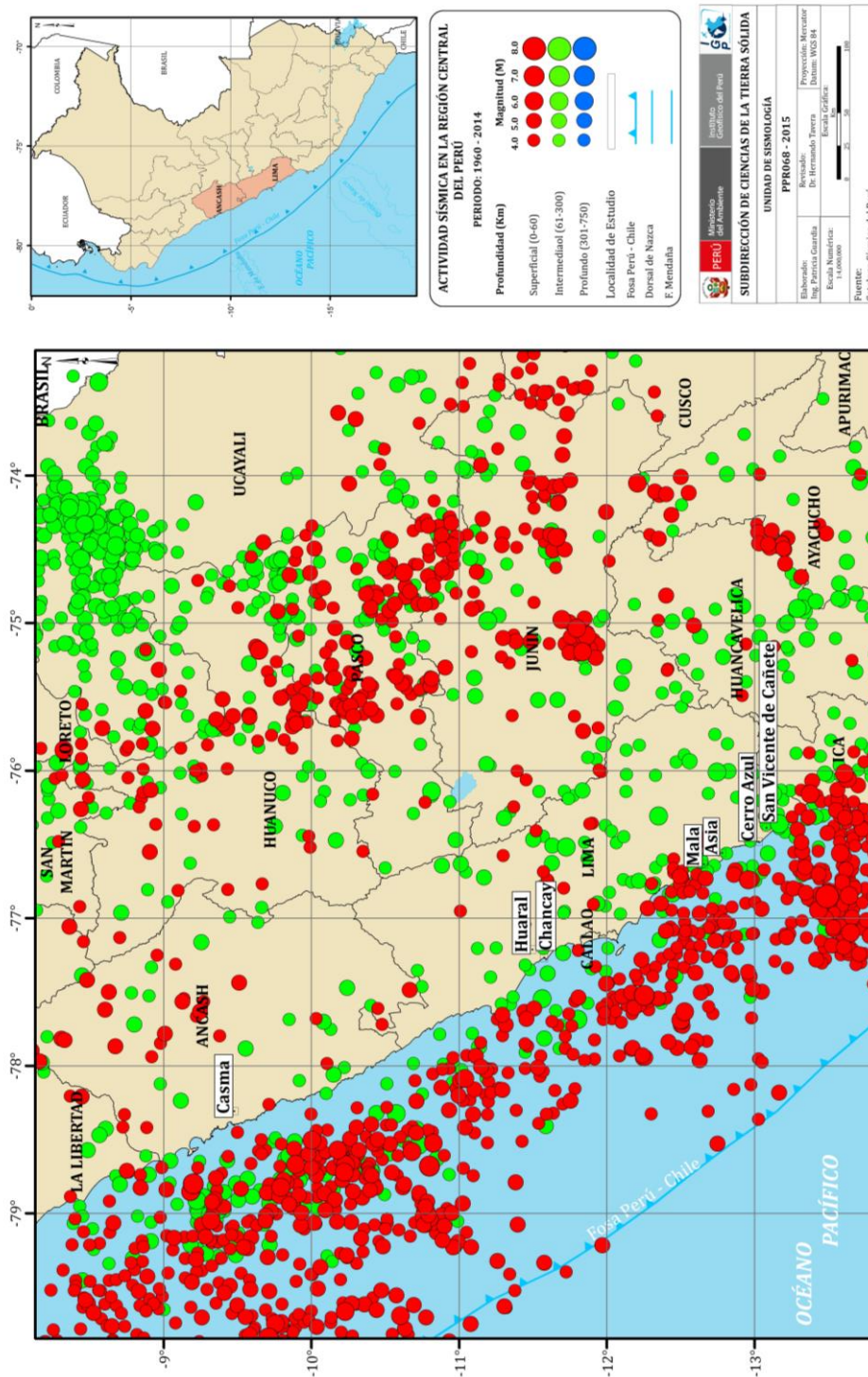


Figura 12: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región central del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

.- El Terremoto de Lima de 1828 ocurrió el 30 de marzo y devastó Lima, Callao, Chorrillos, Chancay-Huaral y otras poblaciones costeras del centro del Perú, especialmente las situadas al norte de Lima (Norte Chico). El terremoto llegó a generar un tsunami local.

- Las ciudades de Casma, Chancay y Huaral, así como su área circundante sufrió los efectos del tremendo terremoto de 1940 y el subsiguiente tsunami en caso de Chancay (Figura 13).
- En 1966, otro terremoto frente a Casma-Chancay-Huaral causó graves daños al llamado Norte Chico, y al área de Lima-Callao. En Chancay produjo 30 muertos y 4.000 damnificados. En la catedral del Callao, durante una ceremonia murieron 24 personas al caer parte de paredes. Un moderado tsunami causó graves daños en el Callao y en Pucusana. En total el sismo cobró 200 vidas, de las cuales 100 murieron en Lima-Callao.
- En 1970, conocido como terremoto y aluvión de Ancash de 1970, sacudió todo el departamento de Ancash, siendo el más destructivo por la cantidad de pérdidas de vidas humanas en Ancash, Huánuco, Lima y La Libertad. En ciudades como Casma los daños en viviendas y edificios fueron del 80%, además de daños importantes en la Carretera Panamericana con la formación de grietas que impidió el tránsito vehicular. El número de afectados superó la cantidad de 500 mil. Este terremoto dejó muchas lecciones que aprender, pero lamentablemente la ciudad de Casma, por ejemplo, sigue creciendo sin tener en cuenta la historia sísmica de la ciudad. La intensidad de sacudimiento en la ciudad de Casma fue de VIII (MM), Figura 14.



Figura 13: Noticias en el diario El Comercio sobre los daños producidos en la costa de la región central del Perú por el terremoto de 1970.

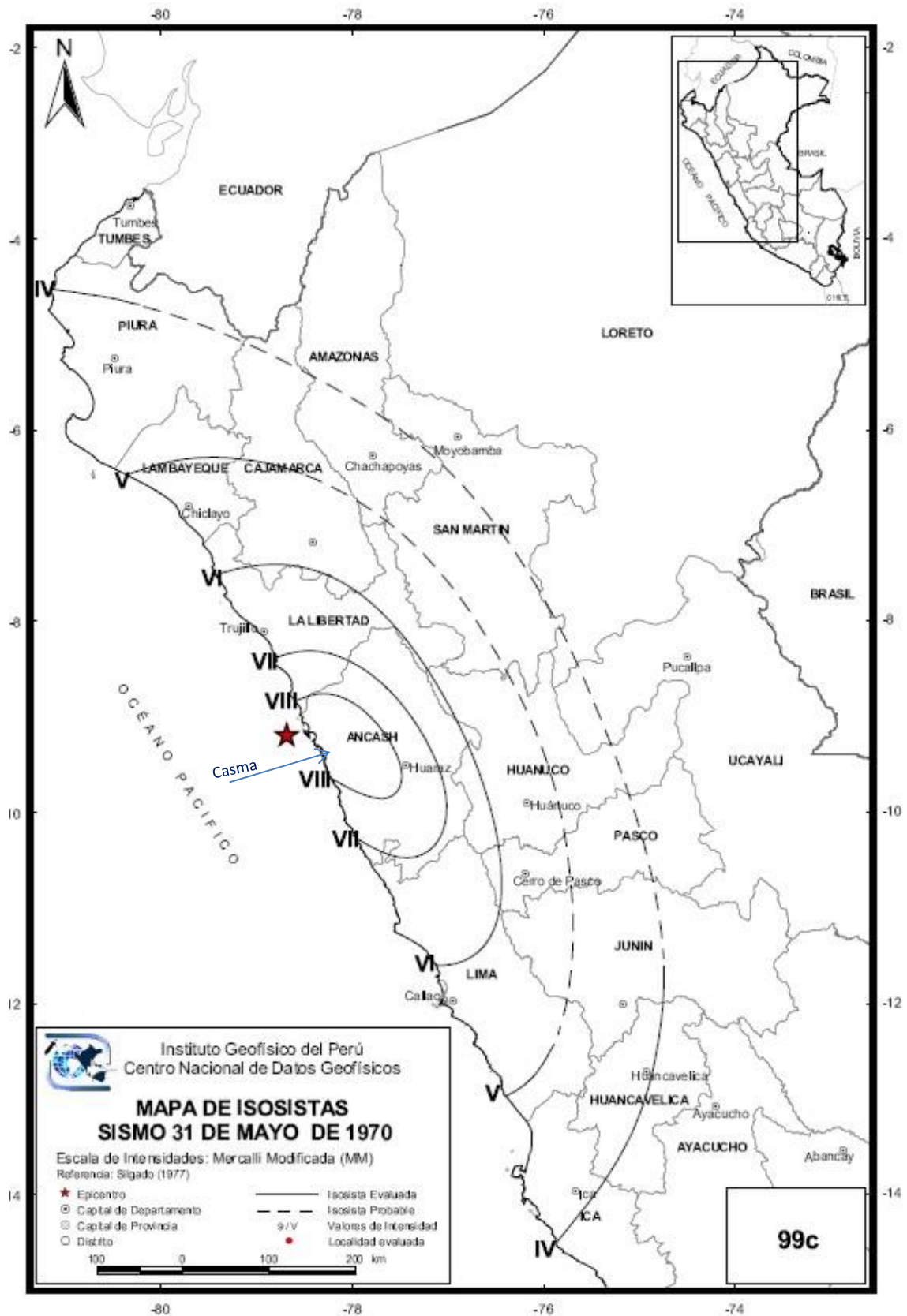


Figura 14: Mapa de isosistas para el terremoto del año 1970 que afectó a la ciudad de Casma con intensidades del orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada

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 VIII (MM); por lo tanto, Casma es una ciudad expuesta a alto riesgo para el caso de sismos.

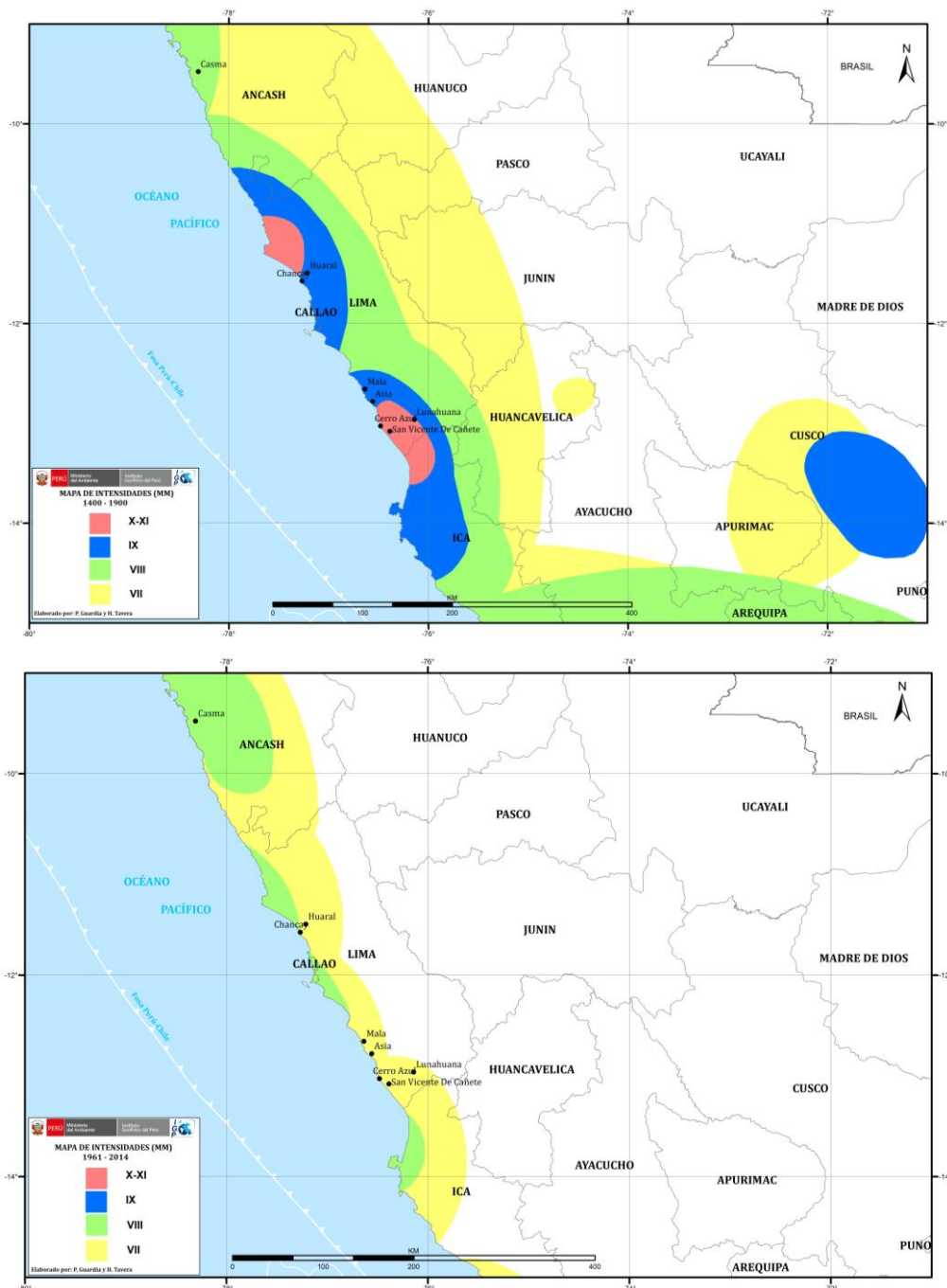


Figura 15: Mapas de isosistas (MM) correspondientes a sismos históricos (1400 – 1900) e instrumentales (1961 – 2014) ocurridos en el borde occidental de la región central del Perú

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que los estudios realizados sobre la distribución espacial de la sismicidad y de la deformación cortical, han permitido identificar 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 con el estudio realizado por Villegas-Lanza et al (2015) sobre la distribución de asperezas en el borde occidental del Perú. El sismo propuesto sería comparable al ocurrido en el año 1746 y que afecto 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, en la ciudad de Casma se esperaría daños en un gran número de viviendas y probablemente escenarios de licuación de suelos. A fin de tener información más cuantitativa sobre los posibles daños a presentarse en la ciudad de Casma, se debe complementar este estudio con evaluaciones catastrales y estructurales.

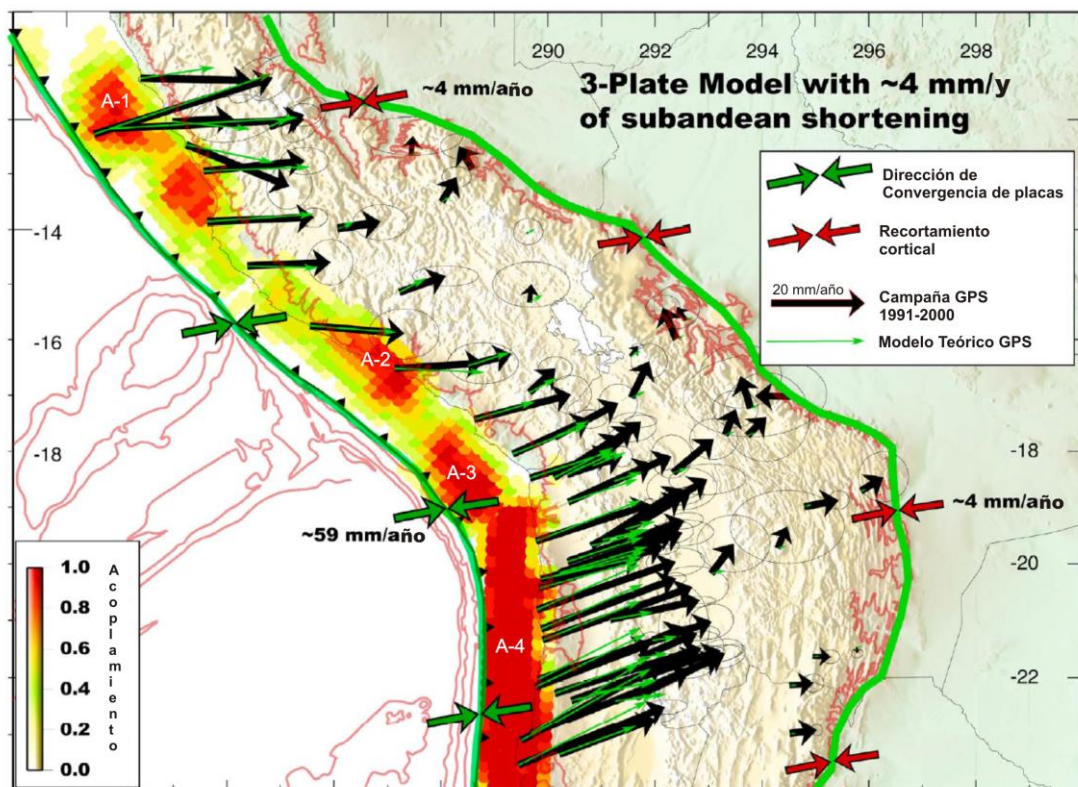


Figura 16: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos sísmicos y GPS. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

## 8.2.- Peligro sísmico

Esta metodología permite conocer, en términos de probabilidad, la severidad sísmica con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso y/o periodo 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).

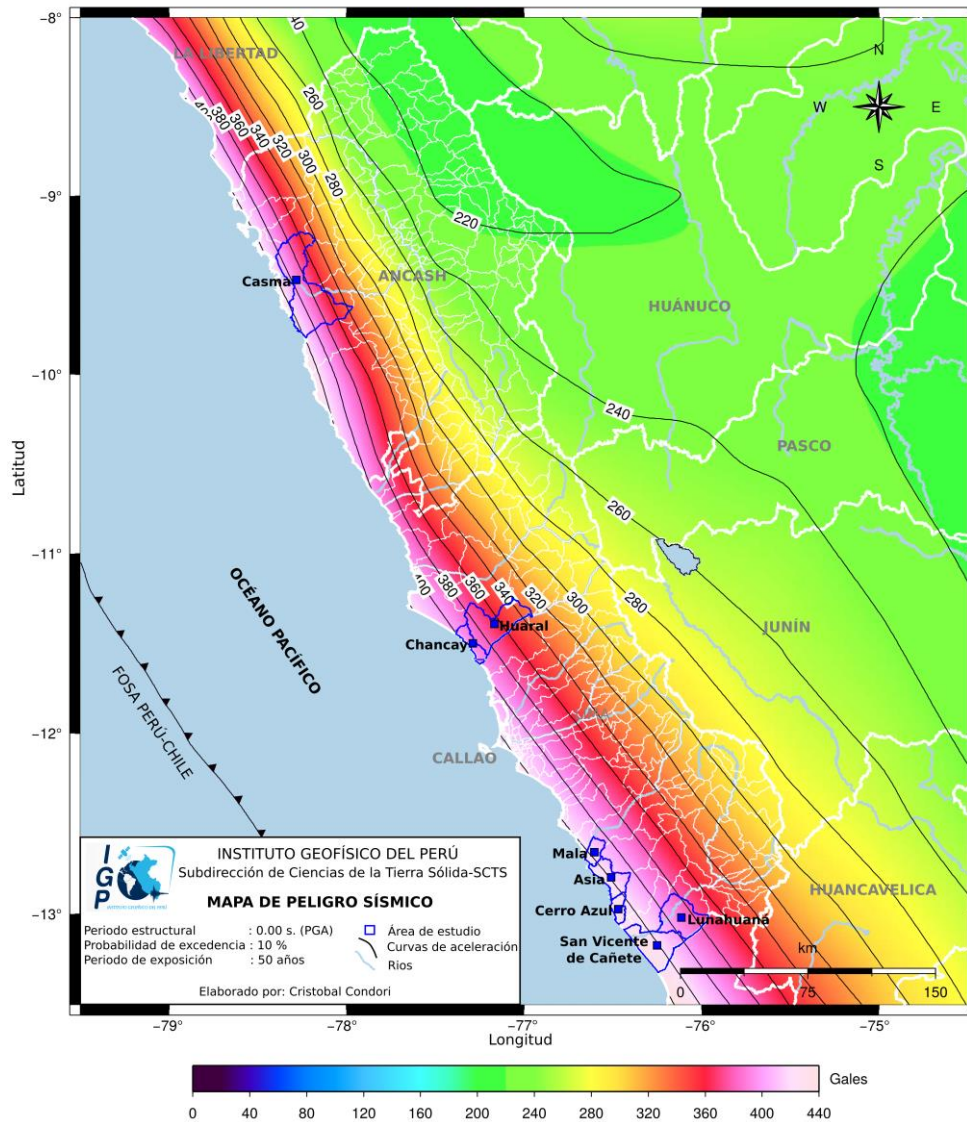


Figura 17: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Para el área que abarca la ciudad de Casma se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 360 a 420 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, tal como ocurrió en la zona con el sismo del año 1970 (Silgado, 1978).

## 9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

### 9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Huaral 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 Casma. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida para un área de 21 km<sup>2</sup>, y se concluye que la zona urbana de la ciudad de Casma se asienta sobre un relieve con alturas mínimas de 30 m.s.n.m y de máximas de 50 m.s.n.m.; mientras que, en los alrededores, hacia el extremo NE y SE de la ciudad se tienen topografías que alcanzan altitudes de 140 m.s.n.m. (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 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 Casma 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 Huaral se encuentra ubicada sobre terrenos cuyas pendientes van hasta 5°, principalmente sobre un área de 900 hectáreas aproximadamente (Figura 19).

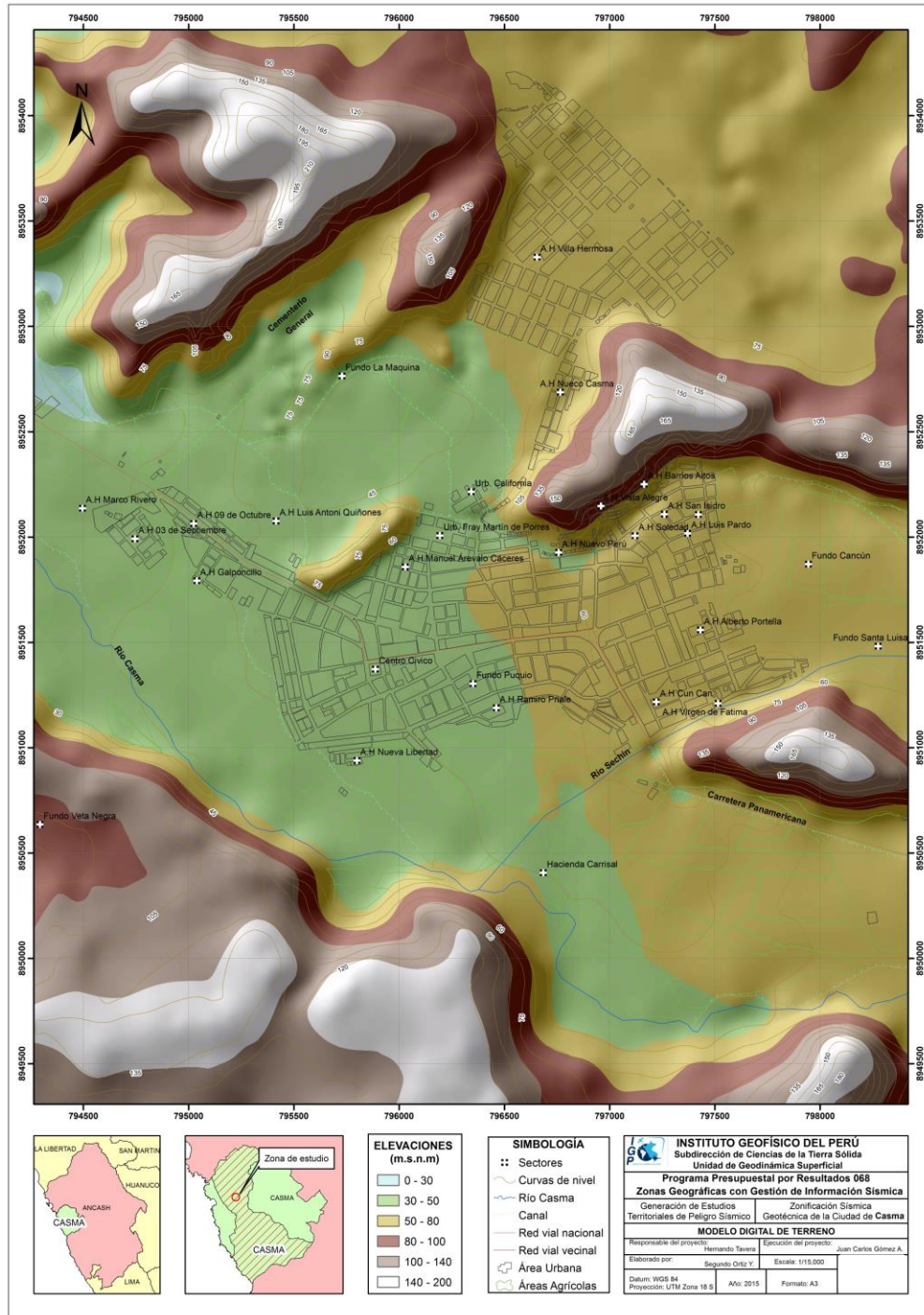


Figura 18: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Casma y alrededores

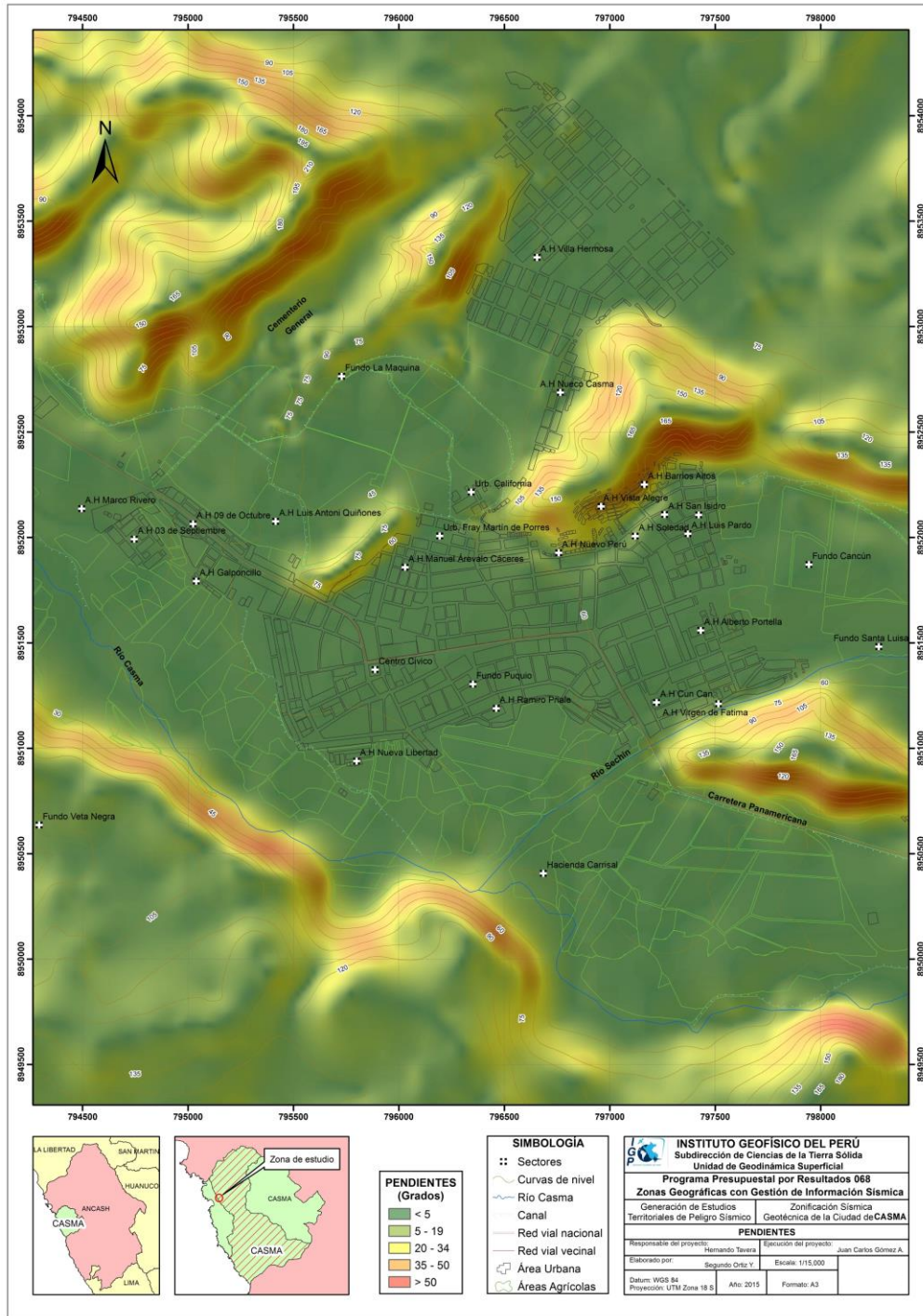


Figura 19: Mapa de pendientes para la ciudad de Casma y alrededores

### 9.1.1. Unidades geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Casma se ha identificado la existencia de 5 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 20):

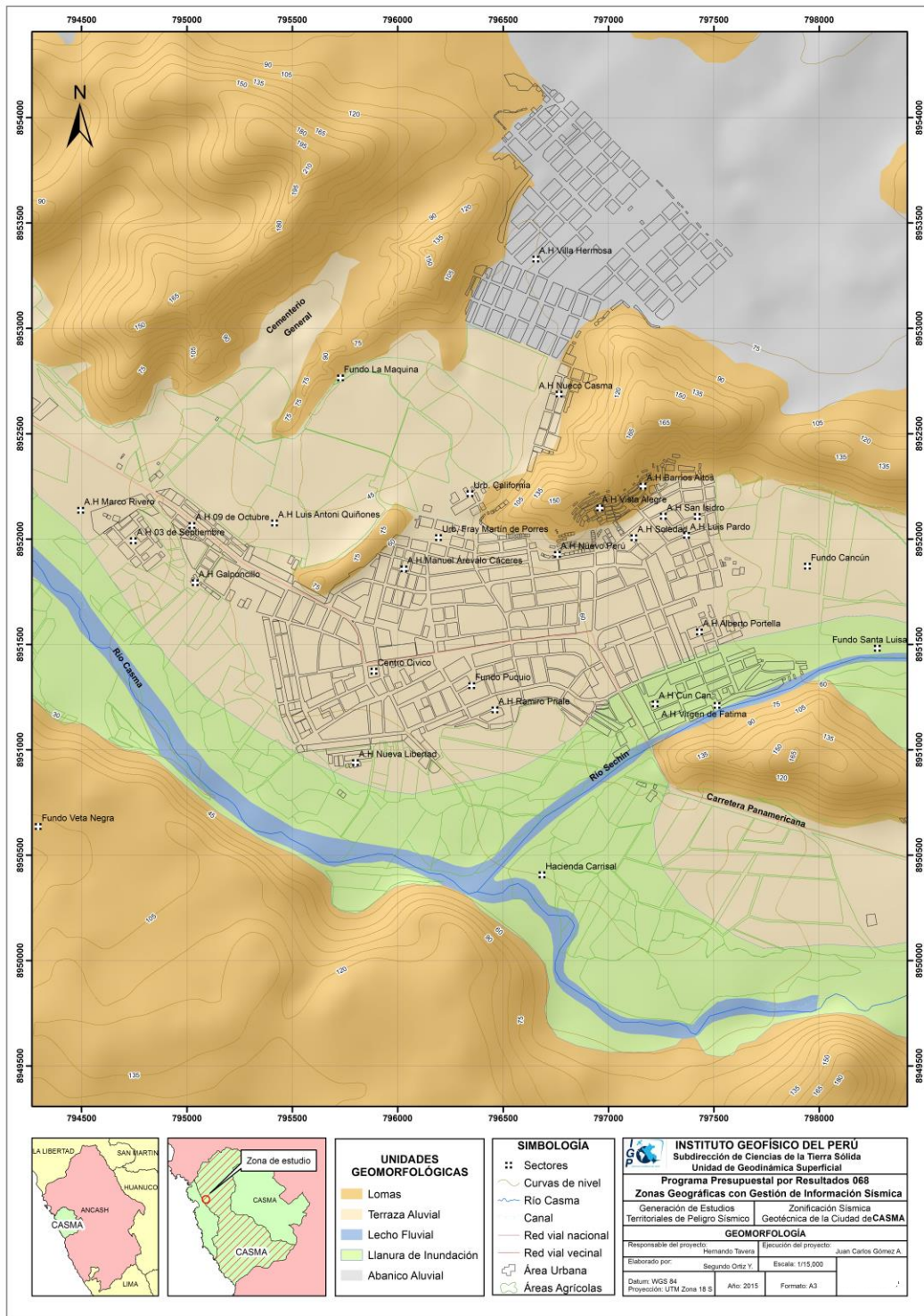


Figura 20: Mapa geomorfológico de la ciudad de Casma y alrededores

### 9.1.1.1.- Origen denudacional

Todas las tierras emergidas, sean por procesos orogénicos o epirogénicos, constituyen el estado inicial de un gran ciclo de denudación, el mismo que comprende un conjunto de procesos (meteorización y/o erosión) que determinan la degradación o erosión de la superficie del terreno. Los procesos de denudación actúan sobre cualquier tipo de roca sin considerar su estructura o composición, y a la vez aceleran o retardan los procesos de desgaste de la misma. En la ciudad de Casma se ha desarrollado el modelado de geoformas como las lomadas, y cuyas características se describen a continuación:

*.- **Lomas:** Son elevaciones de terreno de poca altura y con cimas subredondeadas a planas, cuyo relieve presenta desnivel del terreno menor a 300 m, así como pendientes menores a 30°. Se caracterizan por tener configuración basal alargada y dos vertientes que se inclinan en dirección opuesta. Las lomas Pampa Afuera se encuentran bordeando, a la ciudad de Casma, a 1.29 km al noreste de la ciudad y sobre ellas se sitúan los AAHH Vista Alegre y Barrios Altos. Esta unidad representa el 33% del área de estudio (Figuras 21 y 22).*

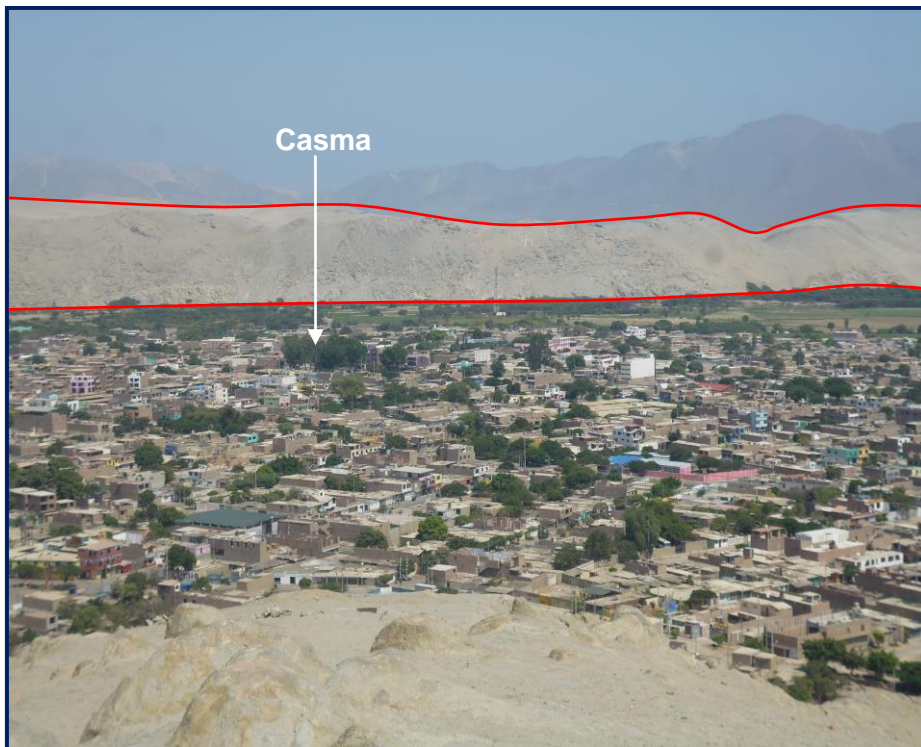


Figura 21: Lomas ubicadas al suroeste de la ciudad de Casma

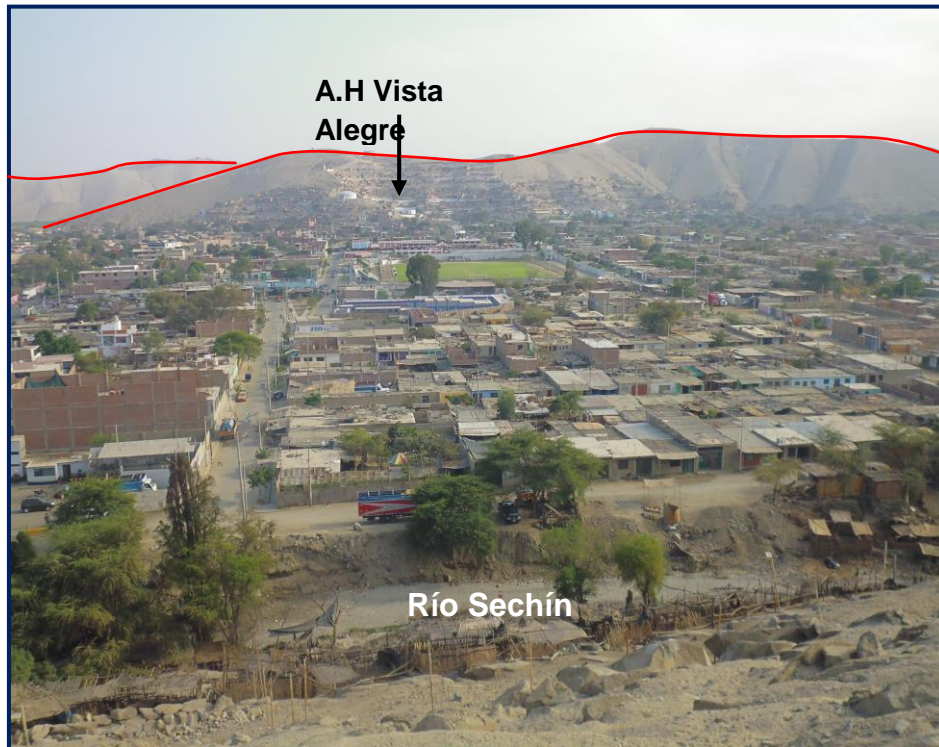


Figura 22: Las lomas de Pampa Afuera están siendo ocupadas con viviendas, AA.HH. Vista Alegre

#### 9.1.1.2.- Origen depositacional

Comprende geofomas resultantes de la depositación de fragmentos o sedimentos originados durante los procesos de erosión y transporte de rocas preexistentes en áreas geográficas generalmente de baja pendiente. Entre las unidades geomorfológicas se encuentran las relacionadas a la dinámica aluvial; es decir, terrazas y abanicos aluviales. Debe indicarse que la ciudad de Casma se asienta sobre una terraza aluvial y el AA.HH. Villa Hermosa, sobre un abanico aluvial y cuyas características se describen a continuación:

*.- **Terraza aluvial:** Superficie horizontal o ligeramente inclinada con pendientes menores a 7°. Generalmente, se muestran conformadas por materiales heterogéneos de origen intrusivo (clastos angulosos a subredondeados envueltos en una matriz arenosa y/o fina). Estos materiales han sido trasladados desde los extremos norte, sur y este de la ciudad de Casma y posteriormente depositados en las inmediaciones del mismo distrito. Las terrazas se prolongan hacia el noroeste de la ciudad, constituyendo extensas pampas ubicadas en la margen derecha del río Casma- Esta unidad ocupa un 31% de la superficie total de la ciudad, Figuras 23 y 24.*

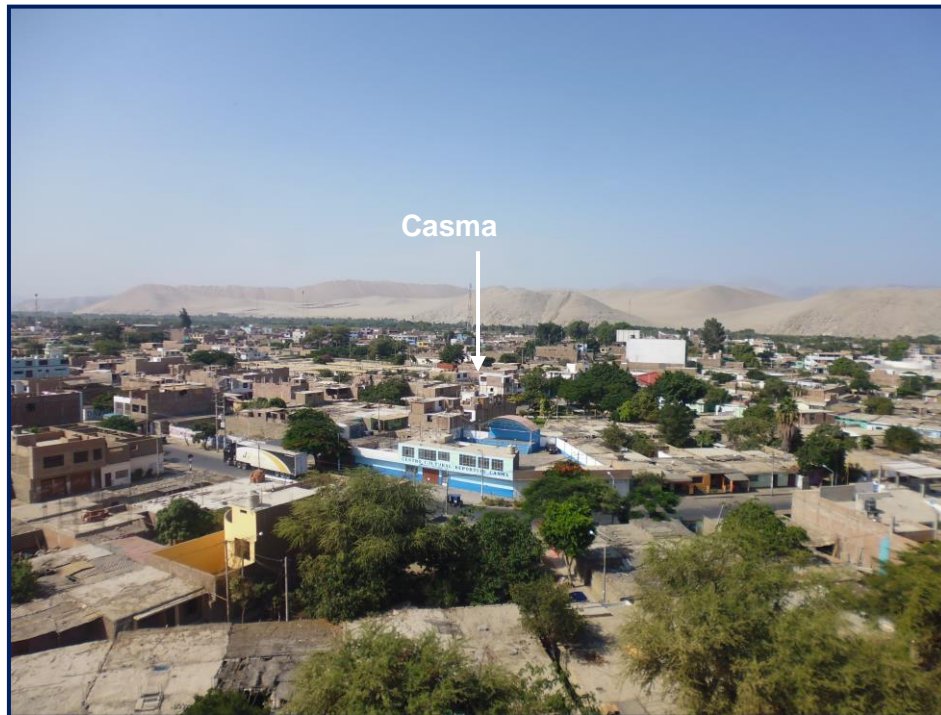


Figura 23: El área urbana de Casma se encuentra asentada sobre las terrazas aluviales



Figura 24: Las terrazas se prolongan hacia el noroeste de la ciudad de Casma, constituyendo extensas pampas en la margen derecha del río Casma

**.- Abanico aluvial:** Superficie ligeramente inclinada con pendientes menores a  $12^\circ$ , siendo originada por corrientes de agua que fluyen rápidamente hasta depositarse en zonas llanas conformando un cono o abanico. Estos abanicos aluviales se encuentran a 2 km al noreste de la ciudad de Casma con alturas que oscilan entre 50 a 80 m.s.n.m y pendientes menores a  $10^\circ$ , ligeramente inclinado hacia el noreste. Litológicamente está conformado por arenas de grano medio a grueso y gravas menores a  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, cuyos aportes vienen desde las lomas y montañas ubicadas en el extremo noreste del AA.HH. Villa Hermosa. Sobre esta geoforma se sitúa el AA.HH. Villa Hermosa, abarcando el 12% de la superficie total de la ciudad, Figuras 25 y 26.



Figura 25: Los aportes para la formación del abanico aluvial (línea azul), vienen desde el noreste de la ciudad de Casma

### 9.1.1.2.- Origen fluvial

El agua de escorrentía es uno de los más importante procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre (Morisawa, 1968). Este crea una gran parte del relieve y forma llanuras de inundación en las que se construyen muchas de las ciudades. Los ríos son 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, su flujo es una de las fuerzas más importantes que operan en la superficie terrestre (Knighton, 1998). En la zona de estudio este tipo de modelado está conformado por agentes externos tales como los cursos de aguas permanentes o regulares, la escorrentía superficial y las redes de drenaje originadas durante los periodos de lluvias intensas. Las formas resultantes de estos agentes son:

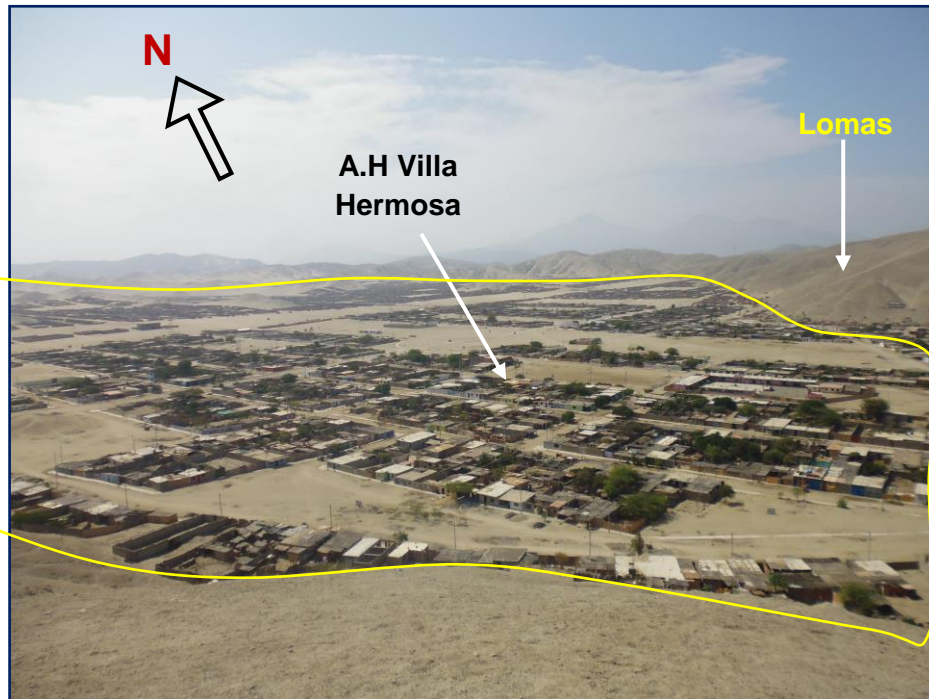


Figura 26: El AA.HH. Villa Hermosa (línea amarilla), se encuentra asentado sobre el abanico aluvial que se encuentra rodeado por las lomas

.- **Lecho aluvial:** Es el canal excavado por el flujo de agua de un río y los sedimentos que éste transporta durante todo su recorrido y evolución. La morfología del lecho depende del caudal, la pendiente, el tamaño del sedimento y de lo erosionable que sea el substrato; es decir, es producto de un equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos y su capacidad de transporte. En la ciudad de Casma se tienen los lechos fluviales de los ríos Sechín y Casma, ambos conformados, principalmente, por materiales fluviales de origen ígneo y diferentes diámetros envueltos en una matriz arenosa. El lecho fluvial representa el 6% del área de estudio, Figura 27 y 28.

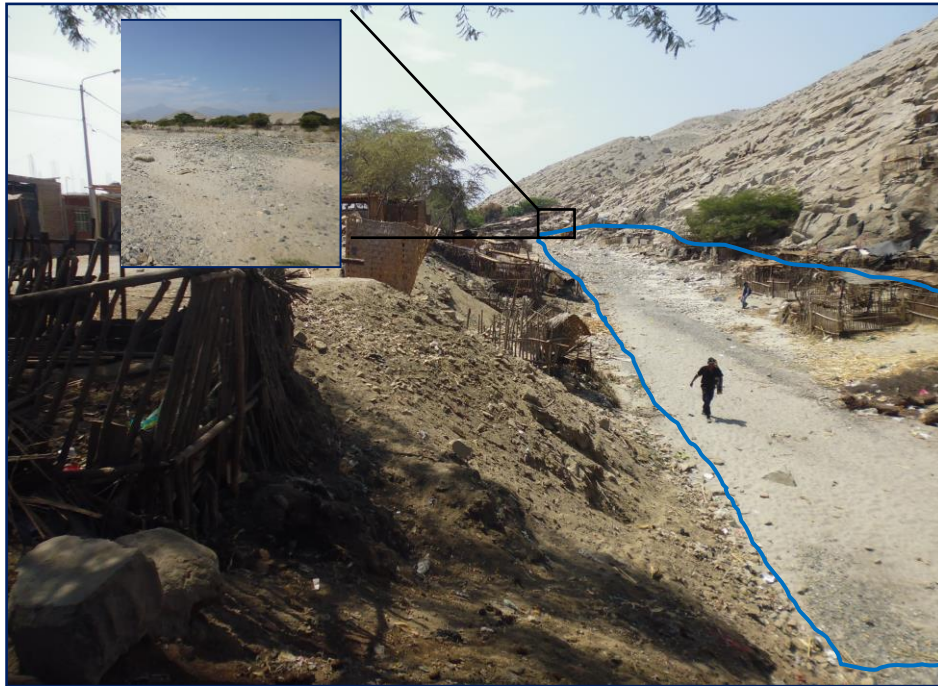


Figura 27: Lecho fluvial del río Sechín en época de estiaje. Está conformado por gravas de origen ígneo en matriz arenosa que se acumulan en el cauce, obstruyendo el paso del agua



Figura 28: Las líneas amarillas delimitan el lecho fluvial del río Casma. En algunos sectores presenta vegetación de monte ribereño

**Llanura de inundación:** Superficie adyacente a un lecho fluvial que frecuentemente suele inundarse debido a que presentan relieves con pendientes inferiores a 3°. La geoforma está constituida por materiales granulares y/o finos, que los ríos han depositado en ambos márgenes. El ancho de la llanura de inundación está en función del cauce del río. En el caso del río Casma, se encuentran desde la Hacienda Carrizal hasta 4.2 km aguas abajo. En el río Sechín, desde el fundo Santa Luisa hasta la intersección con el río Casma sobre una extensión de 3.15 km. Representa el 18% de la superficie del área de estudio, Figura 29.



Figura 29: Llanuras de inundación (líneas blancas), contiguas al río Sechín

## 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 Casma.

### **9.2.1- Geología regional**

Se ha utilizado como base la geología regional publicada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Sánchez, 1995), a escala 1:100,000. En la publicación se describen las unidades litológicas aflorantes en las inmediaciones de la zona de estudio, las mismas que consisten en rocas intrusivas de tipo tonalitas (Ki-t-h2) de edad Cretácico Inferior, seguidas de unidades Cuaternarias como: los depósitos fluviales (Qh-fl) y depósitos aluviales (Qh-al) compuestos por materiales heterogéneos, tales como gravas redondeadas a subredondeadas envueltas en una matriz arenosa y/o limosa, pertenecientes al Cuaternario Reciente (Figura 30). Las rocas intrusivas forman el substrato rocoso.

### **9.2.2- Geología local**

In situ, se procedió con el reconocimiento y cartografiado de las unidades litológicas aflorantes en la ciudad de Casma a escala 1:15,000, sobre un área de 21 km<sup>2</sup> aproximadamente (Figura 31). A continuación se describen las principales características de estas unidades.




ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOSTRATIGRAFICAS	ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Fluviales Qh-fl  Dep. Fluviales Qh-al 	SUPER UNIDAD JECUAN Tonalita 
	PALEÓGENO			
MESOZOICO	CRETACEO	Inferior		

Figura 30: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades aflorantes en la zona de estudio

**.- Superunidad Santa Rosa:** Compuestos principalmente por rocas tonalitas de edad Cretácico Inferior y que se distribuyen en toda la ciudad de Casma, conformando cuerpos irregulares de diferentes dimensiones. Los afloramientos de este macizo son visibles por su color y por las formas redondeadas de su superficie producto del intemperismo. Conforman el substrato rocoso y afloran principalmente en los cerros La Virgen, Pampa Afuera, Corrales, además de los fundos La Máquina y Veta Negra (Figura 32 y 33). En la ciudad de Casma, los AAHH Vista Alegre y Barrios Altos, se sitúan sobre estas rocas intrusivas.

**.- Depósitos Cuaternarios:** Suprayaciendo al substrato rocoso, conformado por tonalitas, se encuentran los depósitos Cuaternarios de edad Holocena, principalmente de origen aluvial y fluvial.

**.- Depósitos fluviales:** *Materiales resultantes de la meteorización, erosión, traslado y depositación de rocas preexistente, todas transportadas por una corriente fluvial permanente. Se encuentran en el cauce de los lechos de ríos existentes en el área estudiada. Están conformados mayormente por suelos gravosos, con elementos de diferentes diámetros y origen, envueltos generalmente en matriz arenosa o areno-limosa. En la ciudad de Casma se encuentran a lo largo de los ríos Sechín y Casma, formando bancos de*

gravas con arenas, con intercalaciones de limos y arcillas. Según se ha observado en campo, un 80% de las gravas corresponden a rocas intrusivas. En algunos sectores, pueden ocurrir pequeñas acumulaciones de gravas y gravillas redondeadas, Figuras 34 y 35.

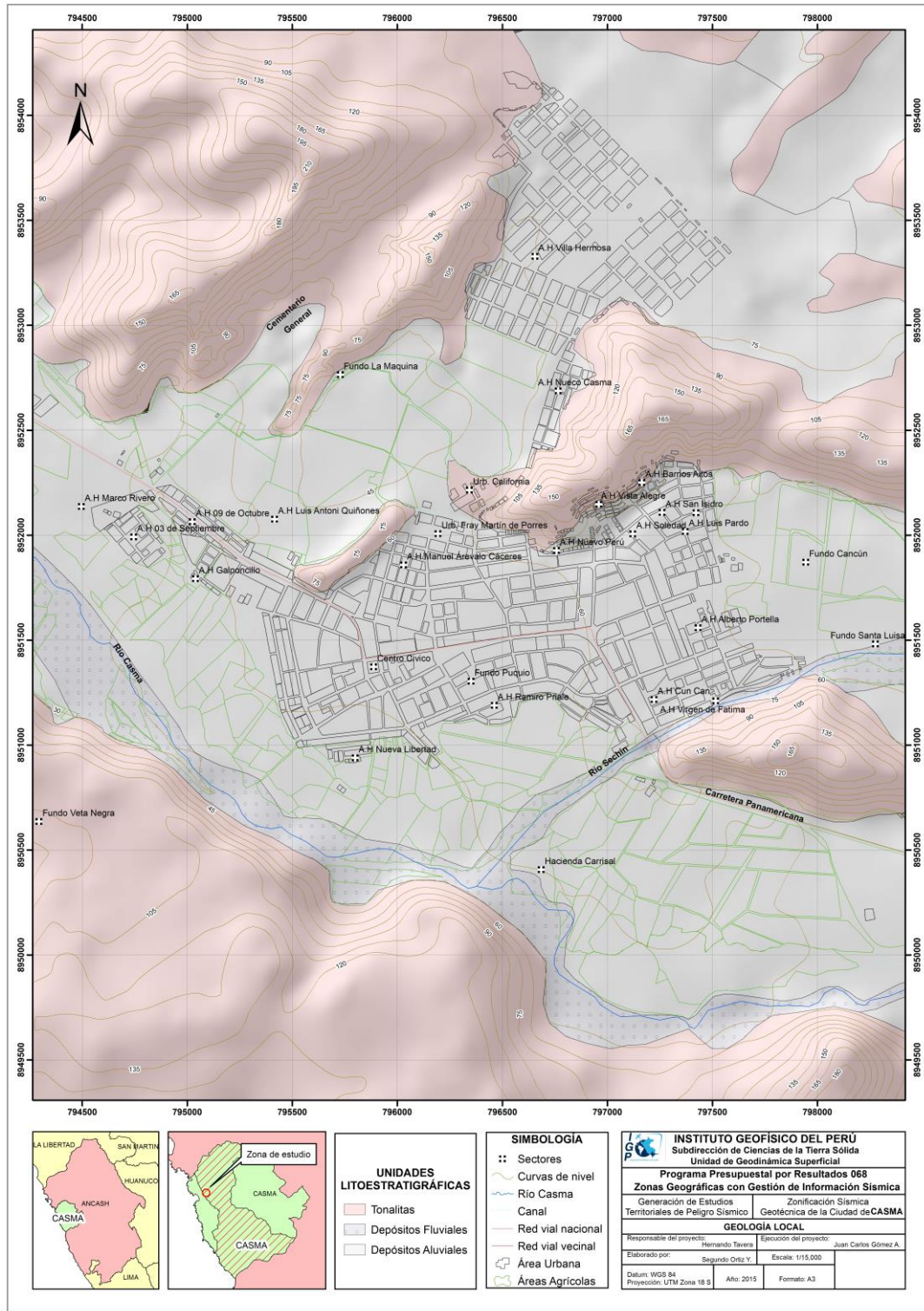


Figura 31: Mapa geológico local de la ciudad de Casma y alrededores

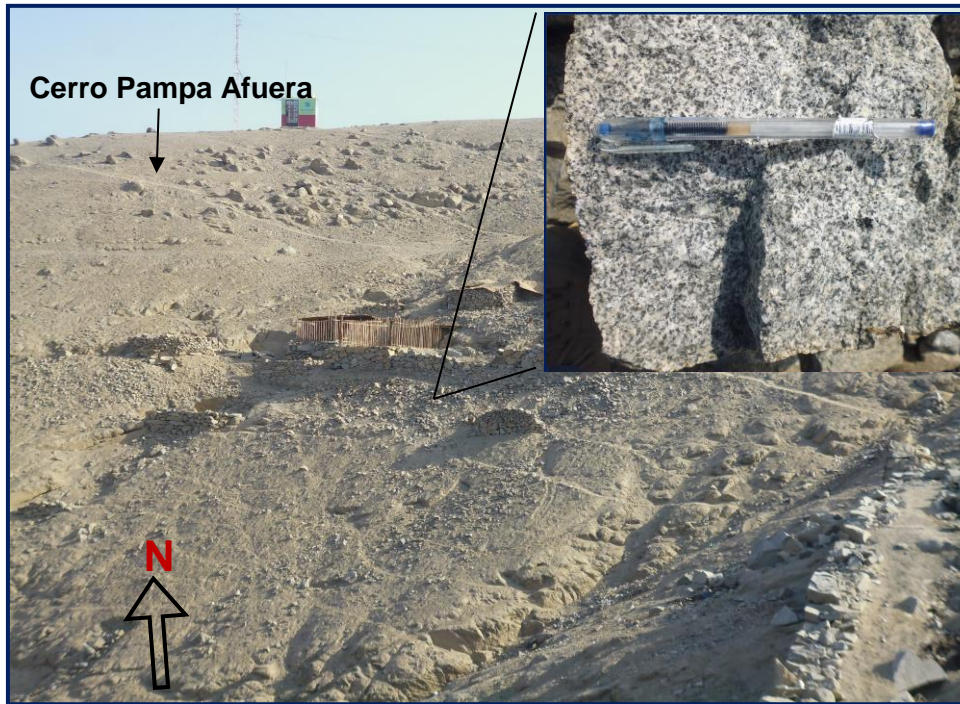


Figura 32: Tonalitas de la Superunidad Santa Rosa, afloran a 1 km al noreste de la ciudad de Casma. Este tipo de roca es usado como material de agregado para la cimentación de casas



Figura 33: Las tonalitas afloran en los cerros La Virgen, Pampa, Afuera y fundo Veta Negra, todos rodean a al área urbana de Casma



Figura 34: Depósitos fluviales (líneas blancas), afloran a lo largo del río Sechín

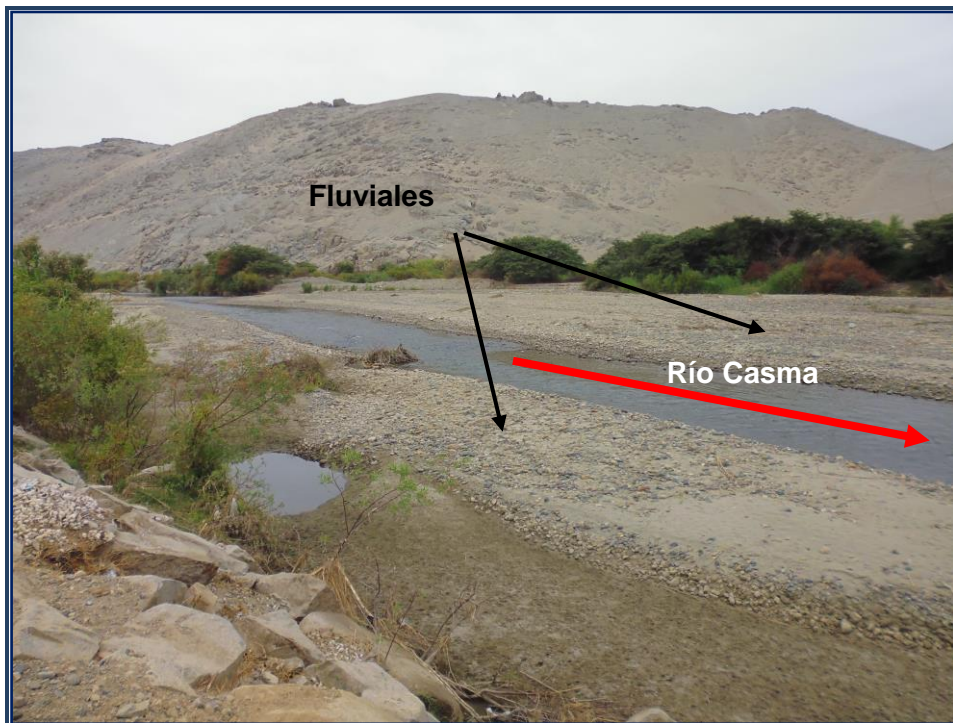


Figura 35: Depósitos fluviales que afloran a lo largo del río Casma, conformados principalmente por gravas y bancos de arena

**Depósitos aluviales:** Materiales resultantes de los procesos de erosión vinculados a los cauces de las quebradas y que son transportados aguas abajo, para luego ser depositados en zonas de bajas pendientes (terrazas). Están constituidos primordialmente por suelos gravosos incluidos en una matriz arenosa o areno-limosa, en algunos lugares se localizan lentes de arena; superficialmente y con poco espesor se encuentran suelos utilizados como terrenos de cultivo, que cubren gravas subyacentes. Estos depósitos se encuentran suprayaciendo a las rocas intrusivas. Sobre este depósito se asienta toda el área urbana de Casma y anexos, abarcando el 58% de la superficie del área de estudio, Figura 36 y 37.

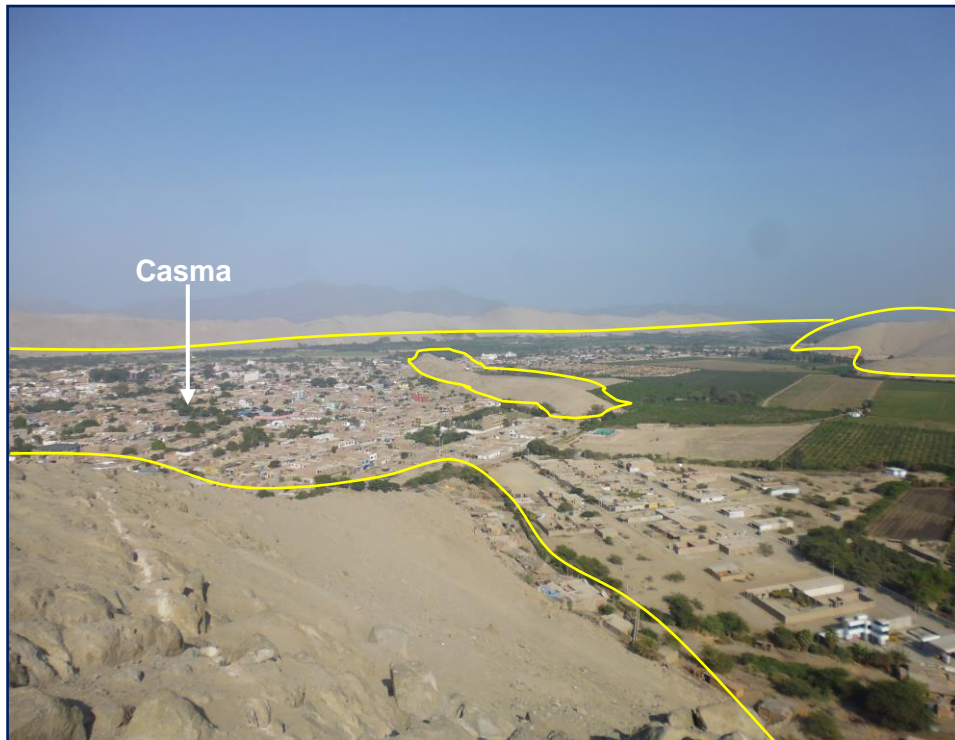


Figura 36: Área urbana de Casma y anexos que se encuentran asentadas sobre los depósitos aluviales (líneas amarillas)

### 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:



Figura 37: Área urbana del AA.HH. Villa Hermosa, está asentada sobre los depósitos aluviales

**.- 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:** Estudia la acción de los procesos exógenos sobre la superficie de la Tierra, donde intervienen diversos agentes como las lluvias, el viento, entre otros; todos originan la destrucción y el modelamiento del relieve. Las precipitaciones pluviales son consideradas uno de los agentes con mayor incidencia en la geodinámica del territorio, pues constituyen el principal factor detonante de las inundaciones; los cuales a su vez afectan la seguridad física de los centros poblados donde ocurren estos eventos.

*La geodinámica externa presente en la zona de estudio, es la responsable de modelar la superficie terrestre y es por ello que, en este capítulo se estudian los procesos dinámicos y activos como los movimientos en masa. Además, la presencia de “El Niño” ocasiona el incremento de la temperatura en la superficie del mar, produciendo lluvias torrenciales con valores que sobrepasan los índices normales de precipitaciones en la costa; mientras que, en la sierra sur, en especial el altiplano, las lluvias son escasas presentándose estadíos largos de sequías. Las condiciones descritas para la costa centro y norte del territorio debido a la presencia de “El Niño”, junto a otros factores relacionados con la actividad antrópica originan a las inundaciones.*

### **9.3.1.- Inundaciones**

Para la ciudad de Casma, no se ha encontrado evidencias de inundaciones fluviales históricas, debido a que las terrazas de inundaciones fueron invadidas por casas y zonas agrícolas. Además, la versión de diferentes pobladores que fueron entrevistados en campo son demasiadas contradictorias; por tanto, la información no contribuye a la delimitación de zonas inundables, siendo necesario proponer escenarios de inundaciones fluviales en base a los análisis probabilísticos.

Las inundaciones fluviales son causadas por el desbordamiento de los ríos y arroyos. Es atribuida al aumento brusco del volumen de agua, denominado crecida, que es por consecuencia del exceso de lluvias. (CENEPRED, 2013). Cuando las lluvias superan el promedio normal de precipitación (más del 50%) de una zona se denominan lluvias extraordinarias o tormenta extrema. Éstas al desarrollarse generan crecidas causando inundaciones de las áreas circundantes al río, siendo la anomalía es conocida como un evento hidrometeorológico extremo.

Para estimar las probables áreas a inundarse ante la ocurrencia de estos eventos, es necesario conocer la variación temporal de la cantidad de 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 hietograma es decir, se representa la variación de altura de precipitación por intervalos de tiempo.

Con estos datos se realiza un análisis de frecuencia; es decir, se establece una curva de tendencia de los datos registrados y posteriormente se pronostica una

magnitud de precipitación para cierto grado de probabilidad (período de retorno). Este resultado, representa el volumen total de agua caído al suelo menos el porcentaje que se infiltra en el mismo suelo, dando lugar al hietograma de la lluvia neta y que representa el agua (mm) que escurrirá sobre el suelo.

El hietograma de lluvia neta es transformado a un hidrograma, o sea la 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, el mismo que representa ser una aproximación al sistema real a través de leyes físicas que representan los procesos hidrológicos. En este caso la transformación de lluvia a escorrentía (hietograma a hidrograma). Ésta información es ingresada a un modelo numérico hidráulico computacional para simular el escenario de un evento hidrometeorológico extremo a fin de conocer las posibles áreas inundables.

Para la simulación de los eventos hidrometeorológicos, la estimación de áreas inundables y la obtención del umbral de inundación del río Sechín, es necesario utilizar un modelo numérico hidráulico computacional como el FLO-2D. Este algoritmo permite simular el tránsito de avenidas en 2 dimensiones; el flujo en canales (abiertos y cerrados), superficies no confinadas y flujo en calles; y las características físicas del flujo pueden ser modificadas, como la reología (viscosidad, esfuerzo cortante), concentración de sedimentos, composición de sedimentos finos (granulometría del sedimento), etc. Este algoritmo es frecuentemente utilizado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); el Cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), distrito de Sacramento; distrito de Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix, Arizona; y entre otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres.

**.- Datos de entrada del modelo:** El primer dato de ingreso al programa es la topografía del área de estudio, luego es necesario caracterizar el coeficiente de rugosidad del cauce del río y de las áreas circundantes, esto se logra mediante el método del valor del número de Manning ( $n$ ). Con la información topográfica y sus características físicas estimadas de “ $n$ ”, se procede con el ingreso del hidrograma del evento que se desea simular, se realiza la simulación y se extrae la información de las alturas máximas alcanzadas por flujo a fin de identificar la

intensidad del evento. Con los resultados del modelamiento numérico hidráulico computacional, se generan mapas de peligro que ayudarán a visualizar las potenciales áreas a inundarse. En la Figura 38, se presenta un esquema de los datos necesarios que deben ser ingresados al programa FLO-2D para el modelamiento de los eventos hidrometeorológicos.

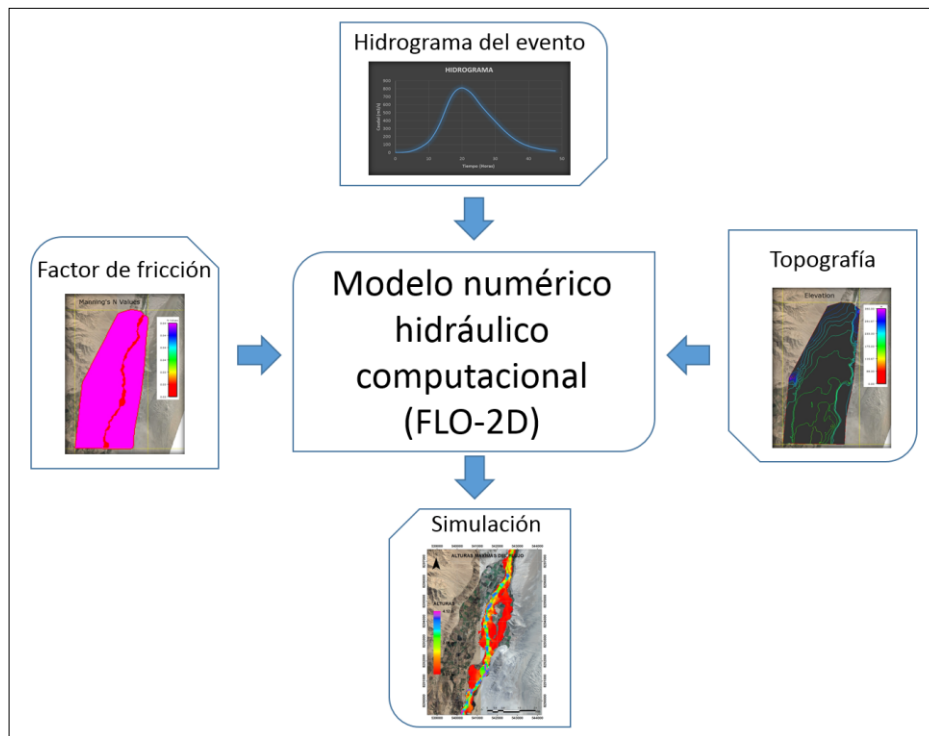


Figura 38: Esquema de datos de entrada al programa FLO-2D

**.- Topografía:** Para el desarrollo de este estudio, se utilizó la información digital obtenida mediante el levantamiento batimétrico con estación total en la ciudad de Casma. La información contiene 32 perfiles transversales del río Sechín en un tramo de 3 kilómetros, desde el punto A (799963.341, 8951471.901) hasta el B (796380.610, 8950361.526), tal como se muestra en la Figura 39. Esta información junto a la batimétrica se ingresó al programa FLO-2D, teniendo un producto final para el modelo digital del terreno y que se utilizó para la simulación de los eventos hidrometeorológicos.

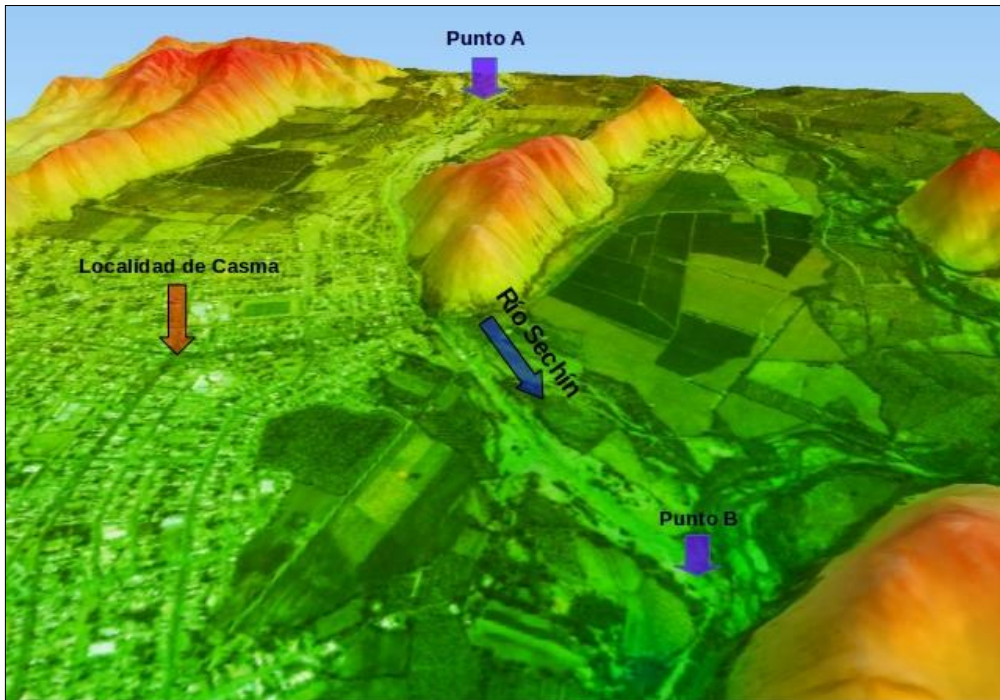


Figura 39: Área de estudio para el cálculo del peligro por inundación

El modelo digital del terreno generado fue ingresado al modelo FLO-2D para realizar el mallado, el mismo que consiste en dividir el modelo digital del terreno en grillas (cuadros) en el cual el modelo calculará las alturas y velocidades del flujo para cada grilla. En este caso, el mallado fue realizado con una resolución de 10 metros, debido a que el ancho del río Sechín presenta medidas entre 20 y 31 metros aproximadamente. La resolución topográfica original fue de 30 metros aproximadamente y mediante una interpolación triangular bilineal, se logró la resolución de 10 metros.

En la Figura 40, se observa la malla del modelo digital del terreno con una resolución de 10 metros, esto quiere decir que por cada  $100 \text{ m}^2$ , para el terreno existe un dato de elevación que representa el relieve del terreno. En la Figura 41, se observa la vista ampliada de la malla en la que se puede apreciar la dimensión de cada cuadrado en comparación con el área de terreno que abarca.

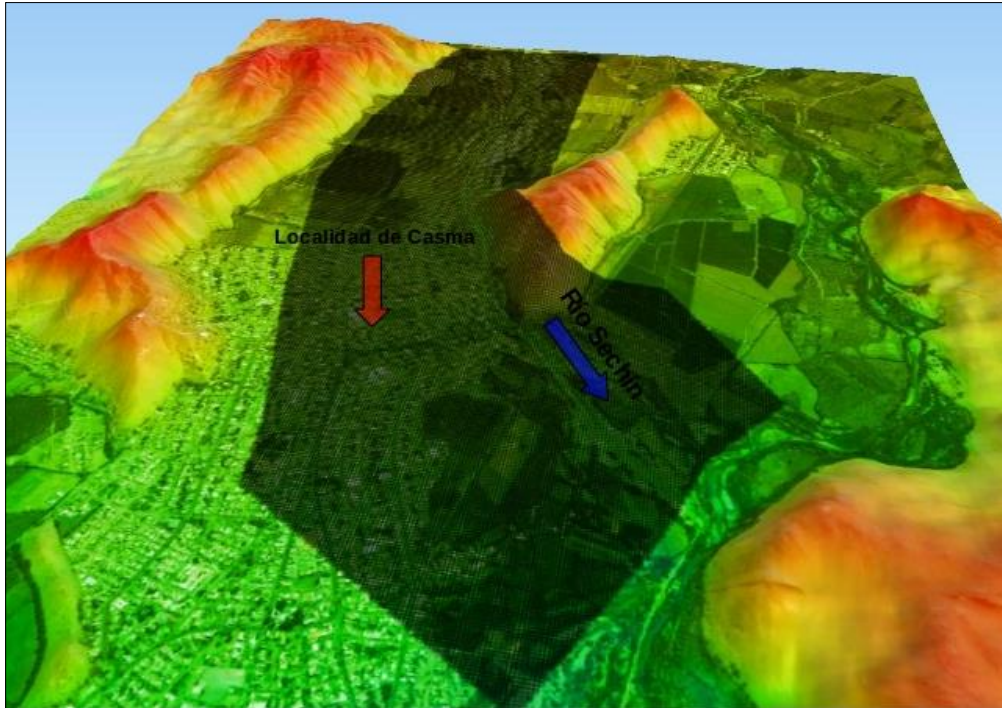


Figura 40: Malla de datos de elevación sobre el área de estudio

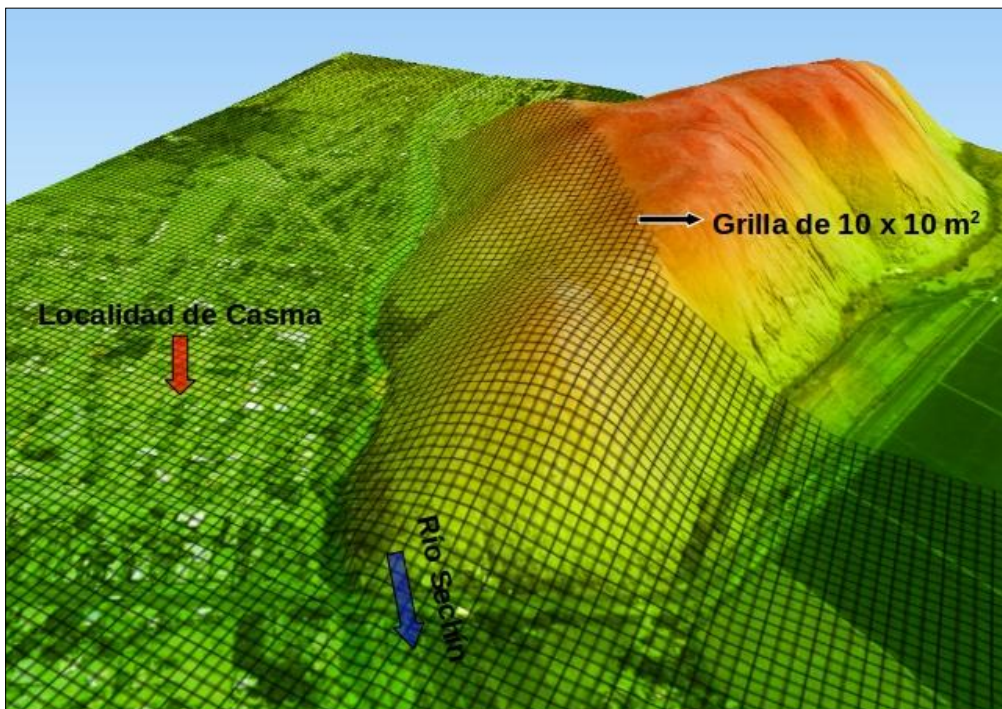


Figura 41: Vista ampliada de la malla sobre el área de estudio

**- Factor de fricción:** El movimiento del fluido en un canal se ve afectado por la fuerza de gravedad, como la fuerza más importante, y la otra es la resistencia ocasionada 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, producido por el movimiento del agua en el paso del tiempo; generalmente su perfil longitudinal es sinuoso, su sección transversal es irregular, y presenta forma y dimensiones que varían continuamente a lo largo del mismo.

Un canal natural nunca posee una sección geométrica constante. El flujo en un río por lo general 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, es de carácter netamente empírico. Donde  $n$  es el factor de fricción, llamado número de Manning, que por ser aplicable a canales hidráulicamente rugosos, depende solo de la rugosidad de la frontera y es independiente del número de Reynolds (relación entre fuerzas inerciales y viscosas).

La aplicación del número Manning (" $n$ "), se restringe a flujo turbulento en canales rugosos. Además, su precisión depende mucho de una selección cuidadosa de " $n$ ", coeficiente que por lo general, se considera dependiente sólo de la rugosidad en las paredes y fondo del canal. Sin embargo, " $n$ " es propiamente un factor de fricción, esto es, 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, 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 tablas, que fueron propuestos por Ven Te Chow (1994) y

son de gran utilidad para una selección del factor de fricción. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 1849), realizó estudios para la determinación del coeficiente de Manning para canales naturales.

Para la selección del valor del número de Manning para el cauce del río Casma y de las áreas aledañas, se utilizó el método de técnicas de campo en superficie de agua por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning propuesta por Ven Te Chow (1994) respectivamente. Como resultado se obtuvo que el valor del número de Manning para el cauce del río Sechín es de 0.03 y para las áreas aledañas de 0.04, esto quiere decir que el cauce del río, antes mencionado, ejerce menor fuerza de oposición al movimiento del flujo que en el de las áreas aledañas (Figura 42).

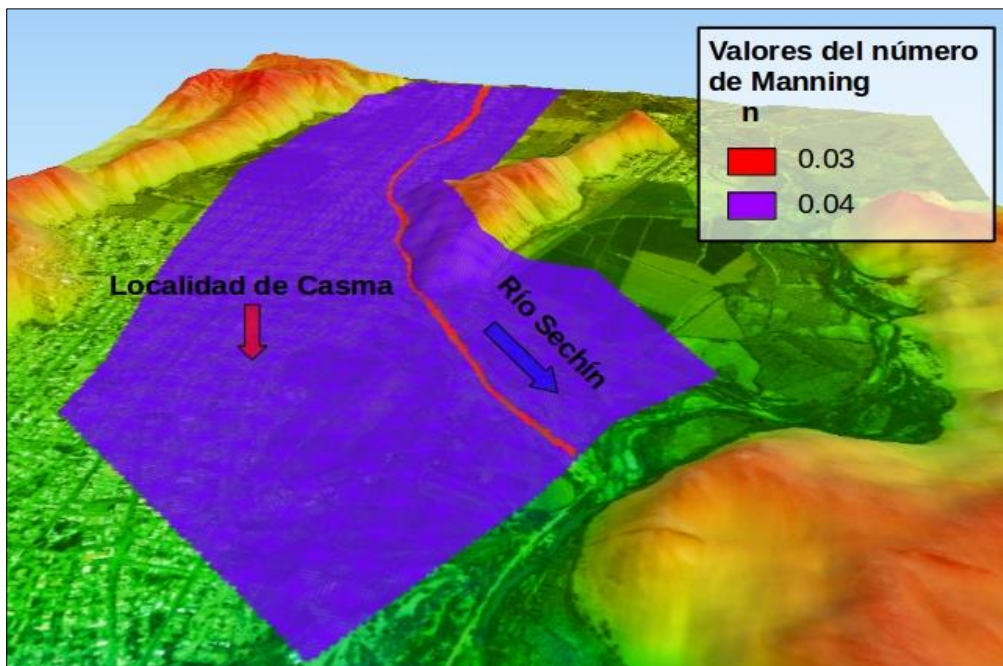


Figura 42: Valores del número de Manning en la localidad de Casma (río Sechín)

**.- Hidrograma de los eventos hidrometeorológicos:** Para el cálculo de los hidrogramas simulados, la metodología varió de acuerdo al tipo de evento hidrometeorológico a evaluar. A continuación se presentan las metodologías utilizadas y los resultados obtenidos para los eventos hidrometeorológicos simulados:

- Evento hidrometeorológico extremo: Dado que en el país se tiene limitaciones en la disponibilidad de datos, ya sea hidrométricos, como pluviométricos y en gran número las cuencas hidrográficas no se encuentran instrumentadas, se debe recurrir a métodos indirectos para la estimación de caudales y tormentas de diseño. Tomando en cuenta las metodologías propuestas por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones en el *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje* aprobado mediante el Decreto Supremo N° 034 – 2008 – MTC; y el Ministerio de Economía y Finanzas en la *Guía Metodológica para Proyectos de Protección y/o Control de Inundaciones en Áreas Agrícolas o Urbanas* aprobada por la Dirección General de Programación Multianual del Sector Público; y otras a nivel internacional, para la estimación de áreas inundables ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, se sigue la siguiente metodología:

- Como dato básico se utiliza las precipitaciones máximas conocidas para las 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 a fin de ajustar al nivel mínimo de significancia (correlación menor a 0.05) para las distintas distribuciones probabilísticas.

a.) *Determinada la distribución probabilística que más se ajusta al registro de datos, se pronostica una precipitación (mm) para un determinado período de retorno. Con esta información se procede a realizar el diseño de la tormenta por medio del método de tormentas hipotéticas del Servicio de Conservación del suelo de los Estados Unidos (US-SCS, 1986) considerando una distribución del Tipo I, debido a que este método (calibrado por pruebas empíricas), presenta semejanza del medio geográfico y del clima marítimo del Pacífico, con inviernos húmedos y veranos secos.*

b.) *Con la aplicación de este método se obtiene el hietograma de la tormenta de diseño, al cual se le restará el agua infiltrada con el método de Número de curva del SCS (1972) debido a la facilidad en el manejo e ingreso de datos. Este modelo se desarrolló en base resultados empíricos de cuencas experimentales en donde se relaciona el potencial de infiltración en una cuenca y la infiltración máxima. Luego se obtiene ecuaciones*

empíricas con distintos coeficientes y para los distintos tipos de suelo y condiciones de humedad.

c.) Este nuevo hietograma, es transformado a un hidrograma a través del modelo de hidrograma sintético unitario del SCS (1972). Este modelo de hidrograma es uno de los más usados, debido a que el hidrograma generado es similar al que puede esperarse en una cuenca real. Este método fue calibrado con mediciones de caudales en zonas rurales de gran tamaño y en cuencas pequeñas. En la Figura 43, se presenta un esquema que resume la metodología aplicada para el cálculo del hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo.

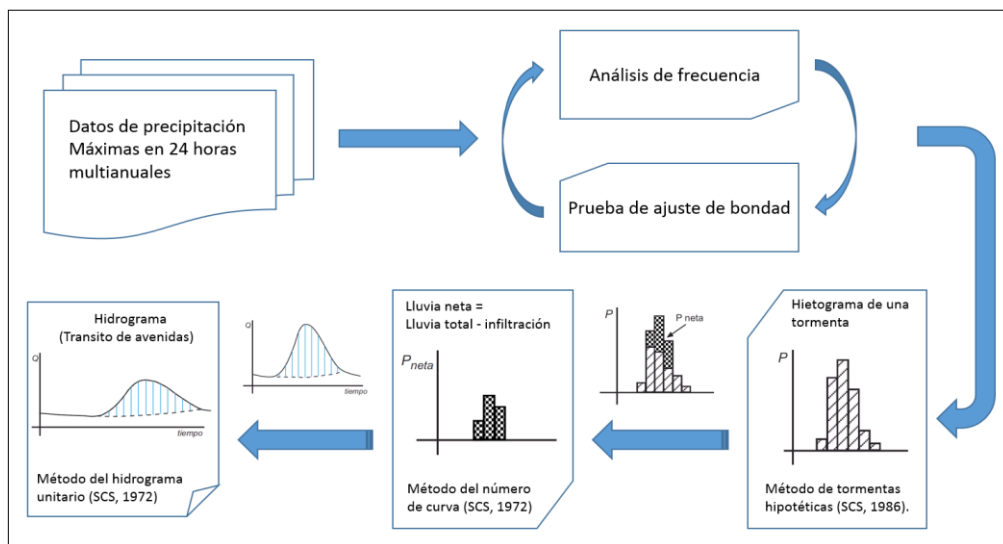


Figura 43: Esquema para el cálculo de un hidrograma de un evento hidrometeorológico extremo

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 ello se delimitó la cuenca del río Sechín a partir de un punto de descarga en las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) 799101.042m, 8951385.220m con datum WGS 84), zona 17 sur. A partir de esta delimitación, se obtuvo los siguientes resultados de los parámetros, presentados en la Tabla 1 y Figura 44.

Tabla 1: Parámetros de la Cuenca del río Sechín

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
<b>SUPERFICIE</b>		
ÁREA	Km.2	729.44
<b>COTAS</b>		
COTA MÁXIMA	msnm.	4918.60
COTA MÍNIMA	msnm.	106.92
<b>RED HÍDRICA</b>		
LONGITUD DEL CURSO PRINCIPAL	metros	69155.30
<b>PARÁMETROS GENERADOS</b>		
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T <sub>c</sub> )	minutos	289.97
TIEMPO DE RETARDO (T lag)	minutos	173.98

Para estimar el tiempo de concentración, se utilizó la ecuación de Kirpich del método de California Culverts Praticce (1942), obteniéndose un tiempo de 289.97 minutos; es decir, el tiempo en que demora en recorrer una gota de agua desde el punto más alejado de la cuenca hacia el punto de descarga. Por otro lado, el tiempo de retardo calculado fue de 173.98 minutos, lo que significa que es el desfase de tiempo entre la precipitación máxima de la tormenta y el caudal máximo que se genera por dicha precipitación.

Con los parámetros calculados de la delimitación de la cuenca del río Sechín, se procedió a calcular el hidrograma del evento extremo. Del informe del ANA, se consideró el valor promedio de la infiltración en la cuenca del río Sechín expresado con un número de curva de 77, así como la precipitación máxima para 24, siendo el valor de 42.13mm para un período de retorno de 100 años; es decir, se tiene una probabilidad de 1% para que esta precipitación no pueda ser excedida. Con este dato precipitación, se calculó el hietograma de una tormenta extrema con el método de tormentas hipotéticas del SCS. Posterior a ello, se calculó el hidrograma que es generado por esta tormenta con el método del Hidrograma Unitario del SCS, restándole la infiltración que se genera por la lluvia.

Para la facilidad de los cálculos se utilizó el software Hec-Hms 4.0 el cual contiene los modelos descritos anteriormente. Se obtuvo que para un tormenta extrema con una precipitación total de 42.13 mm con una duración de 24 horas en un área de 729.44 km<sup>2</sup> genera un caudal pico de 116.5 m<sup>3</sup>/s. En la Figura 45 se muestra el hidrograma generado para un evento extremo en el río Sechín.

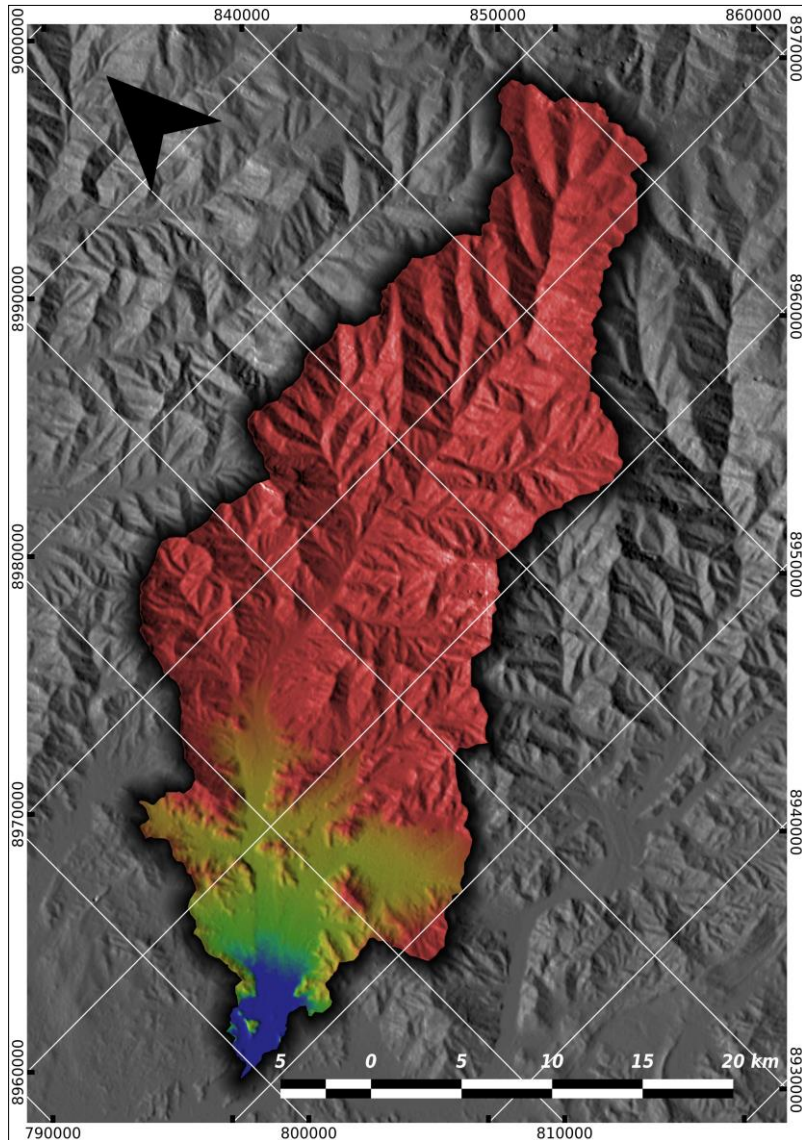


Figura 44: Cuenca delimitada del río Sechín

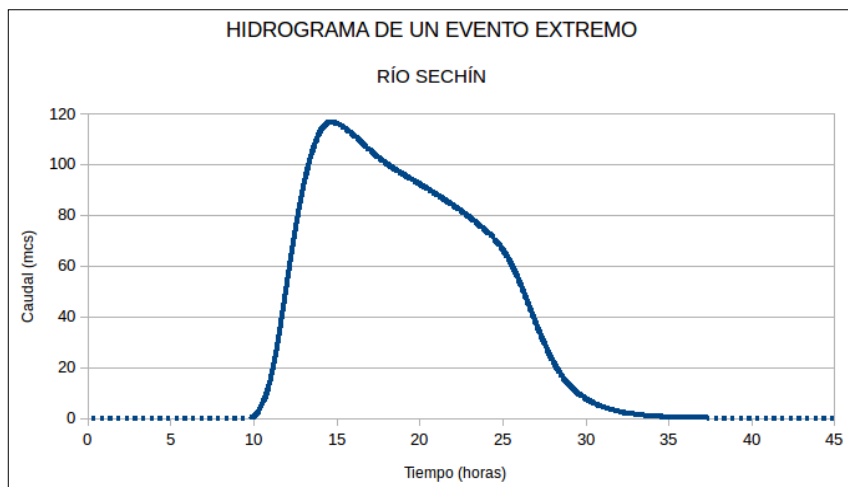


Figura 45: Hidrograma del evento hidrometeorológico extremo en el río Sechín

- **Umbral de inundación:** El cálculo del hidrograma del umbral de inundación; es decir, el caudal máximo que puede fluir en el cauce del río Sechín, antes que ocurra un desbordamiento y provoque la inundación. En tal caso, se realizó simulaciones de flujo permanente (caudales constantes) menores al máximo calculado del evento extremo, hasta llegar al mínimo caudal que produzca desbordamiento. En este caso el umbral de inundación calculado fue de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

.- **Caudales estimados:** En este caso, al no existir un registro de caudales históricos en el río Sechín, estos fueron simulados a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (menor al umbral de inundación) y  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (mayor al umbral de inundación). La generación de los hidrogramas con los caudales mencionados se simularon considerando un flujo permanente (caudal constante).

#### 9.3.1.1.- Modelamiento numérico

Los resultados obtenidos con los hidrogramas generados anteriormente, fueron clasificados a fin de proponer escenarios para evento, por ejemplo para el evento hidrometeorológico extremo, el Escenario I; para el umbral de inundación, Escenario II y para los caudales, los Escenarios III y IV.

- **ESCENARIO I:** La simulación de un evento hidrometeorológico extremo con un caudal de  $116.5 \text{ m}^3/\text{s}$  fue generado para una tormenta de 24 horas de duración. Presento una precipitación máxima de 42.13 mm y un tiempo de simulación de 30 horas con una malla de 10 metros de resolución.

En la Figura 46, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico extremo y en ella se observa que las zonas urbanas y de cultivo son inundadas. Durante el desarrollo del evento extremo, el flujo comienza a desbordarse por las zonas laterales de menor elevación del cauce del río, inundando zonas de urbanas y de cultivo. Cuando el flujo se desarrolla hasta su máximo nivel, se observa que el flujo desbordado por las zonas laterales comienza a escurrir por las calles y avenidas con mayor velocidad afectando viviendas, centros comerciales, cultivos, etc.

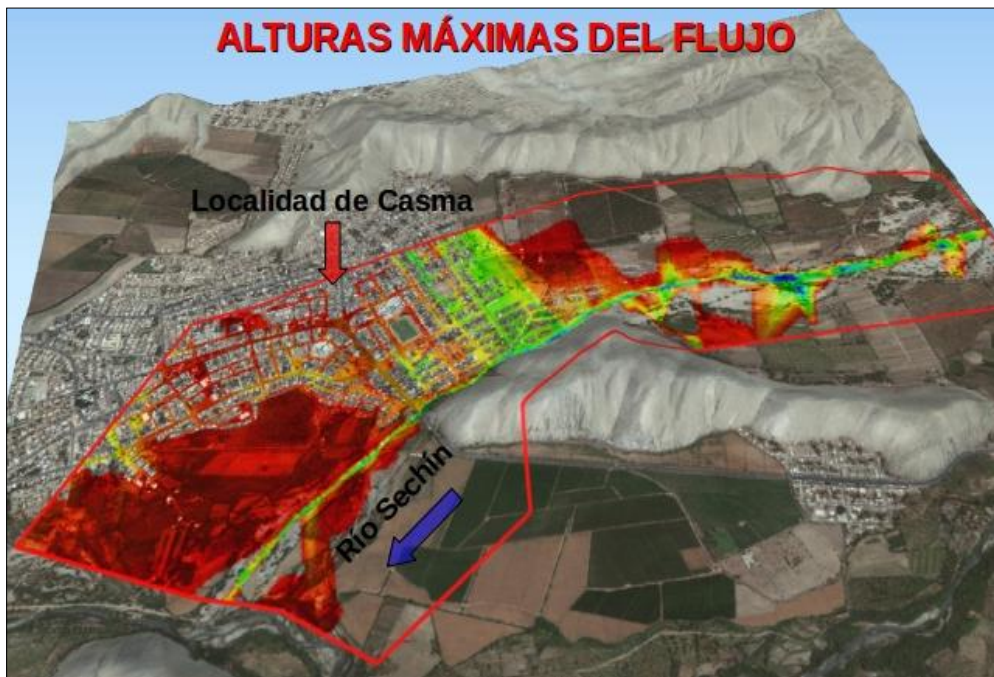


Figura 46: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo en un evento hidrometeorológico extremo

En general, el flujo llega a alcanzar alturas de hasta 5.25 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 2.11 metros, tal como se puede observar en la Figura 47. Las áreas inundadas en el margen izquierdo del río Sechín son 30 hectáreas y en el margen derecho 200 hectáreas aproximadamente.

**.- ESCENARIO II:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  (umbral de inundación), con tiempo de simulación de 5 horas y una malla con resolución de 10 metros. En la Figura 48, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante la simulación considerando diferentes caudales. Los resultados muestran que para medidas cercanas a  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ , el flujo comienza a desbordarse de su cauce; por lo tanto, se puede considerar 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 urbanas y por el puente Sechín, inundando un total de 13.52 hectáreas.

El flujo alcanza alturas de hasta 4.07 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 1.63 metros, tal como se puede observar en la Figura 49.

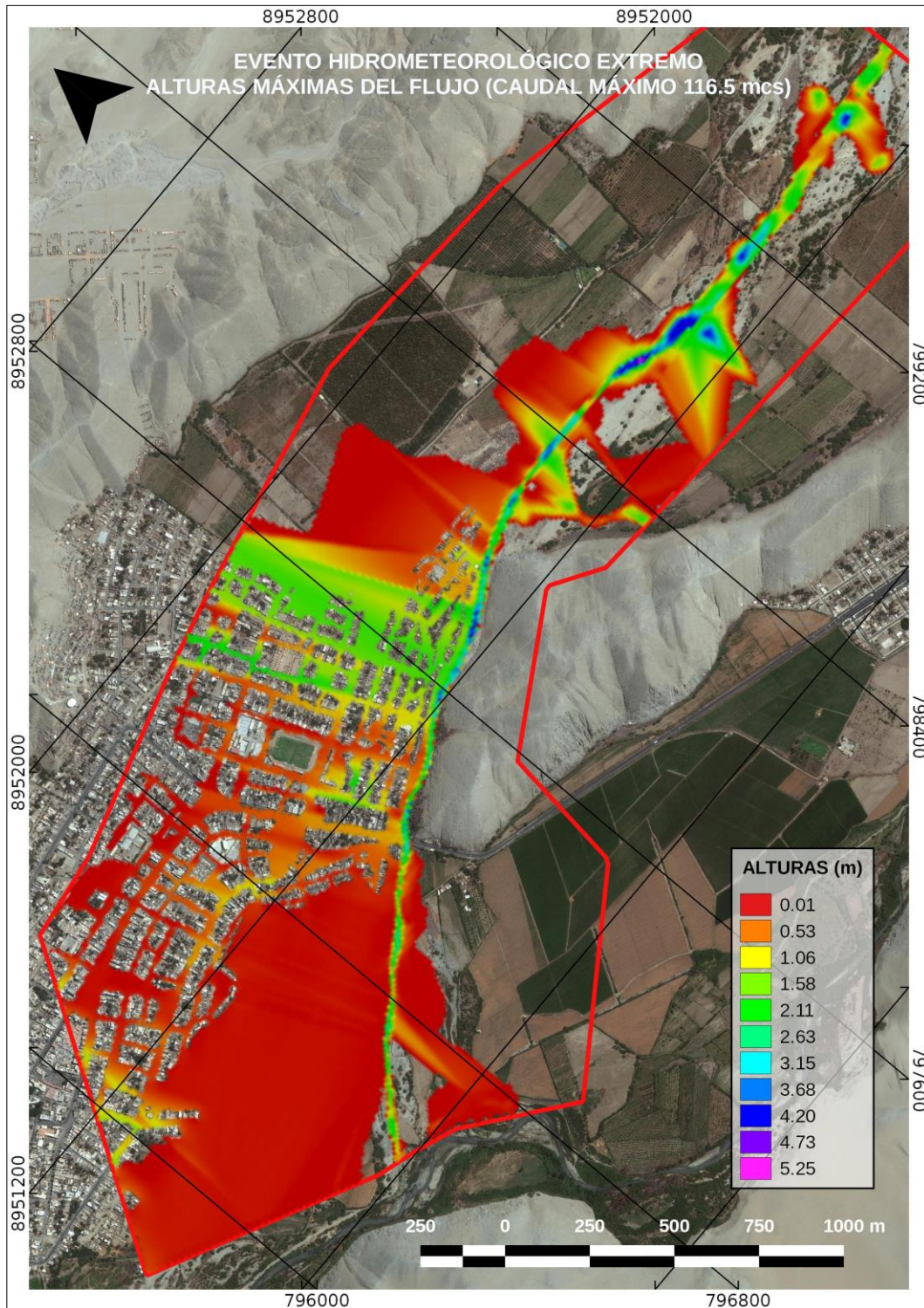


Figura 47: Vista en planta de alturas del flujo del evento hidrometeorológico extremo



Figura 48: Vista tridimensional de las alturas máximas del flujo para el umbral de inundación

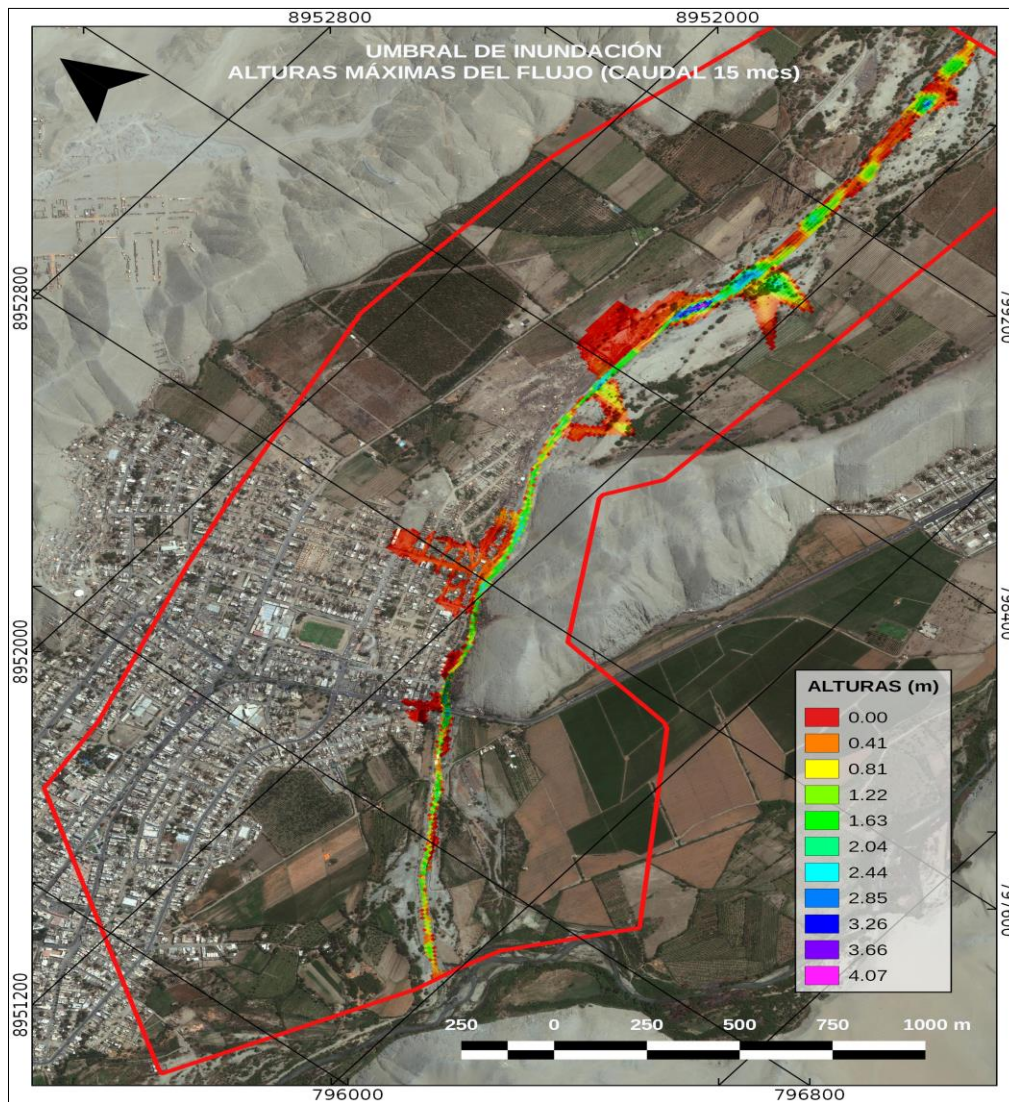


Figura 49: Vista en planta de alturas máximas del flujo para el umbral de inundación

.- **ESCENARIO III:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , con un tiempo de simulación de 5 horas y una malla con resolución de 10 metros. En la Figura 50, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante este evento hidrometeorológico, muestran las áreas inundadas similares a las obtenidas con el umbral de inundación, pero en este caso, el flujo no ingresa a las zonas urbanas, pero alcanza alturas de hasta 3.82 metros produciendo la inundación a un total de 6.15 hectáreas. En las zonas inundadas, el flujo se estabiliza alcanzando alturas de 1.53 metros, tal como se observa en la Figura 51.



Figura 50: Vista tridimensional de alturas máximas del flujo para un evento hidrometeorológico con un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$

.- **ESCENARIO IV:** Simulación de un evento hidrometeorológico con un caudal histórico de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  con un tiempo de simulación de 5 horas y una malla con resolución de 10 metros. En la Figura 52, se observa las alturas máximas alcanzadas por el flujo durante un evento hidrometeorológico, y en ella se observa que se produce inundación en las zonas de cultivo (aguas arriba de la zona urbana). El flujo también comienza de escurrir por las calles de las zonas urbanas al inicio de las viviendas de la ciudad de Casma, además del puente Sechín llegando a inundar un total de 16 hectáreas.

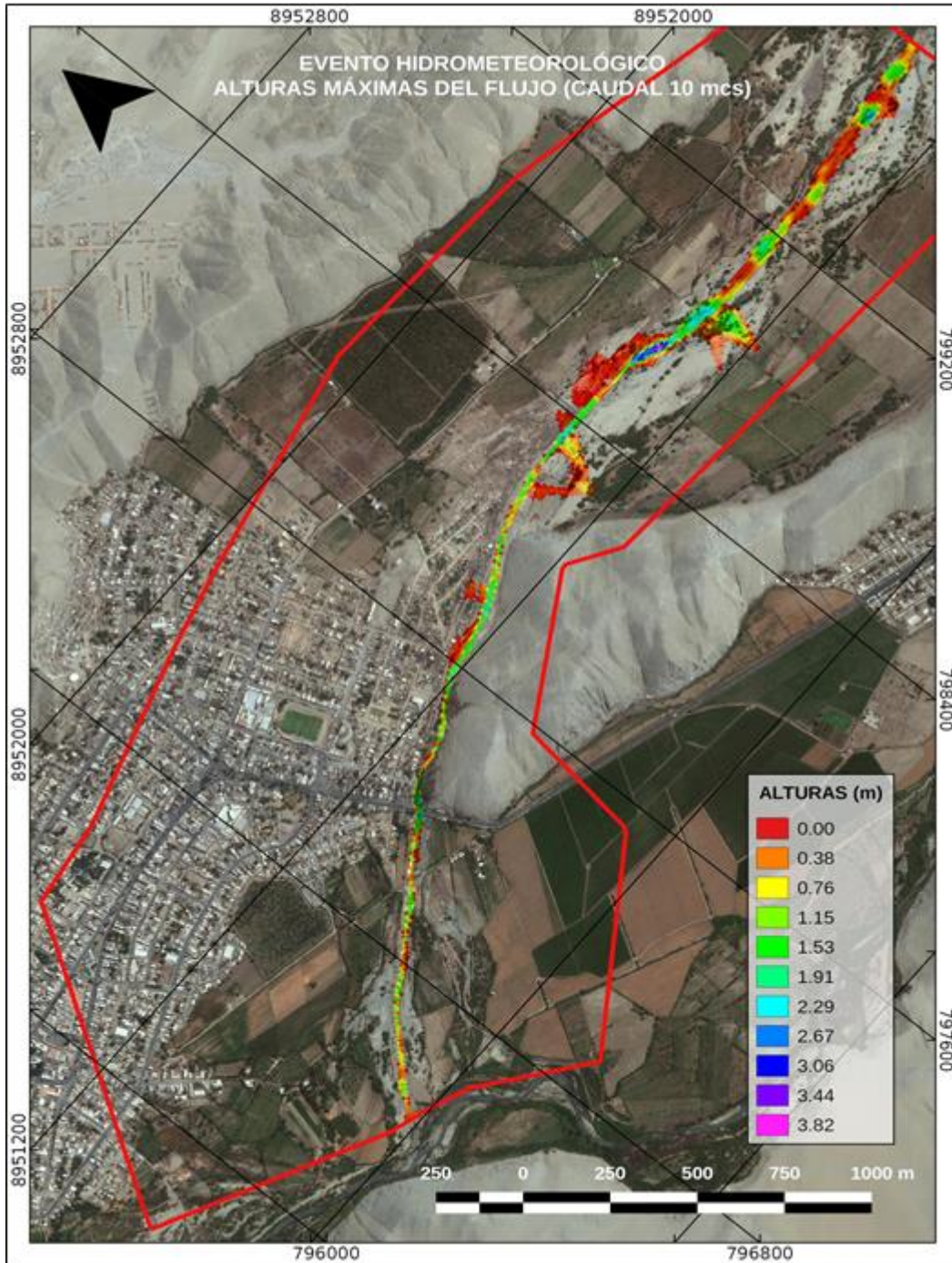


Figura 51: Vista en planta de alturas máximas del flujo para un caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$

También se observa que el flujo llega alcanzar alturas de hasta 4.24 metros (medidos desde el fondo del río). En las zonas inundadas las alturas del flujo llegan hasta 1.70 metros.

De acuerdo a todos los resultados obtenidos en la modelización, se concluye que el río Sechin se desborda cuando su caudal extremo es de  $116.50 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

afectando áreas donde se encuentran los Fundos Santa Luisa y Cancún, los AA.HH. Alberto Portella, Virgen de Fátima, Cun Can, Fundo Puquio, Ramiro Prialé y Nueva Libertad, tal como se observa en la Figura 53. Asimismo, se debe considerar en estos escenarios que la zona inundable abarcaría la Av. Luis Ormeño (avenida principal de la ciudad), continuando por toda la avenida hasta su intersección con la Av. Gamarra, pasando por la calle Huarmey hasta la avenida Libertad, lugar donde se reduce su intensidad, para luego llegar finalmente hasta el AA.HH. Nueva Libertad. El desborde del río Sechín también afectaría áreas agrícolas anexas al cauce del río en mención. En la margen izquierda del río Sechín, el desborda es de menor intensidad y solo afectaría áreas agrícolas pertenecientes al Fundo Carrizal.

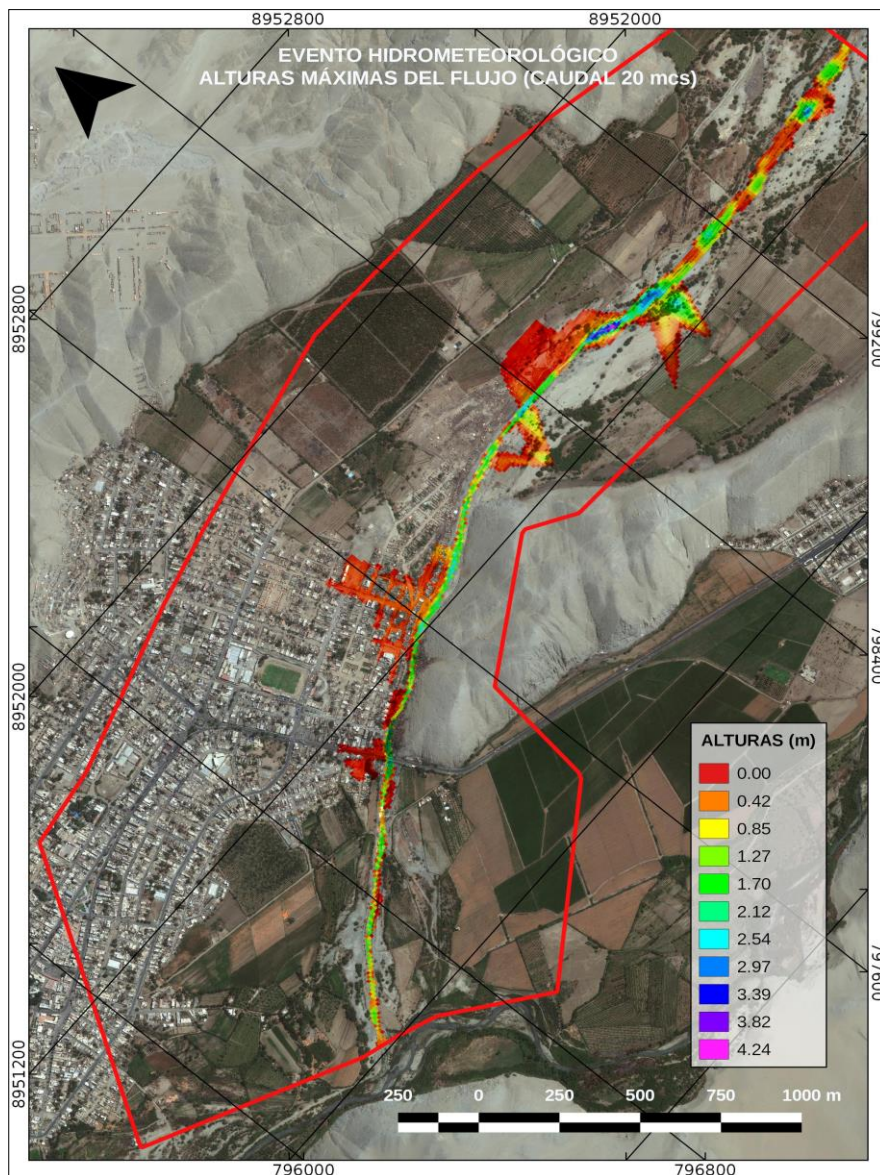


Figura 52: Vista en planta de alturas máximas del flujo para un caudal histórico de 20 m<sup>3</sup>/s.

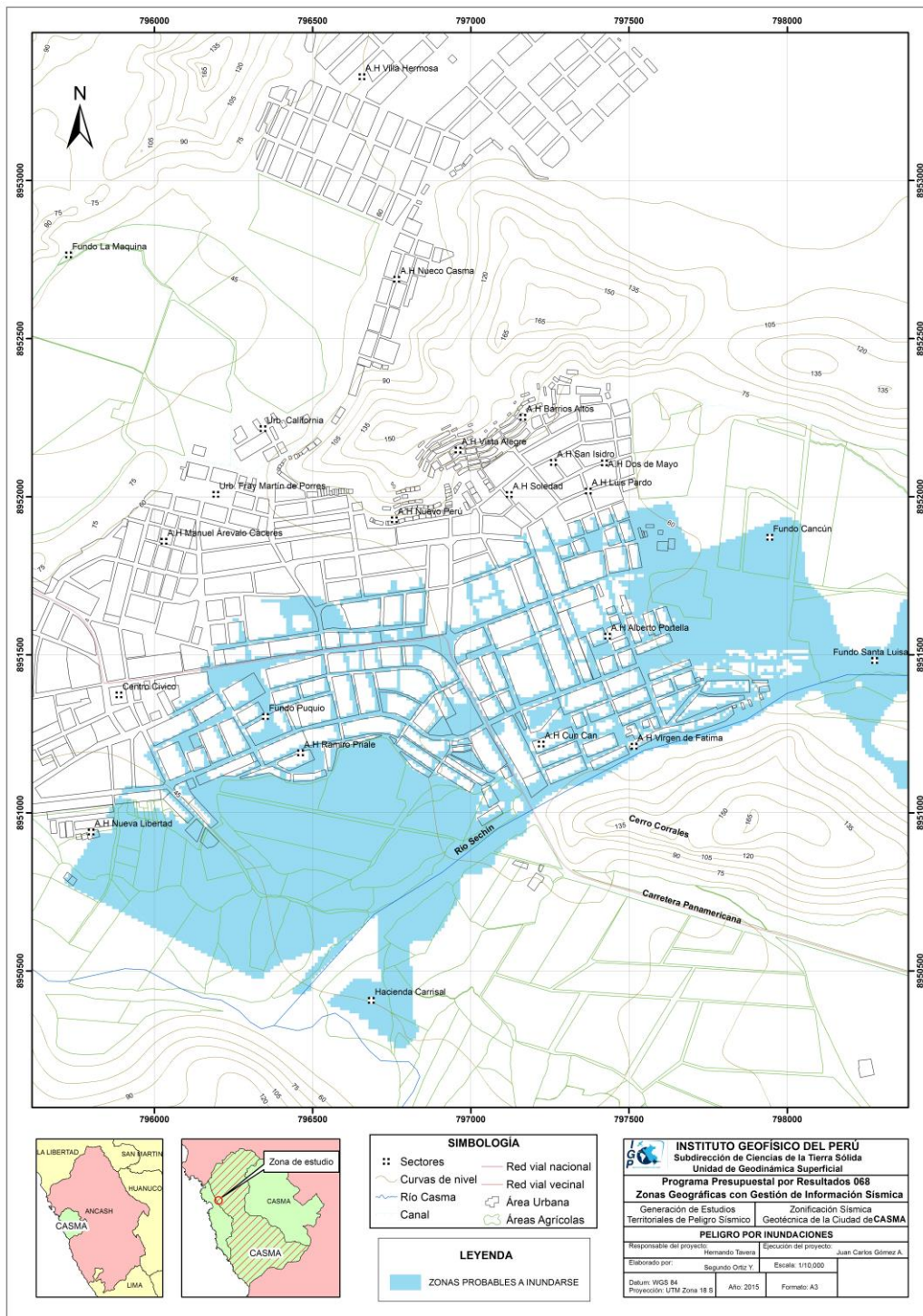


Figura 53: Zonas afectadas por inundación por el posible desborde del río Sechín como producto de caudales críticos

## 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 Casma se recolectó información según las siguientes técnicas:

**.- Exploraciones a cielo abierto** (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Casma se construyeron 10 calicatas (Tabla 2 y Figura 54), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.0 metros y la mínima de 1.20 metros (ver Anexos) debido principalmente a la presencia de nivel freático en el AAHH Marco Rivero (Calicata (C-01)).

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 A (m)
C - 01	794509	8952141	30	1.20	1.20
C - 02	795478	8952076	38	3.00	N.P.
C - 03	795853	8950850	44	1.80	1.80
C - 04	796299	8952100	49	2.70	N.P.
C - 05	797250	8951587	57	3.00	N.P.
C - 06	797543	8951419	60	3.00	N.P.
C - 07	797337	8952309	65	3.00	N.P.
C - 08	796886	8952791	70	2.90	N.P.
C - 09	797499	8953286	66	2.10	N.P.
C - 10	796634	8953796	63	2.50	N.P.

**.- Densidad de suelo in situ** (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó ensayos de campo aplicando el método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales (ver Anexo). Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de

suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 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.

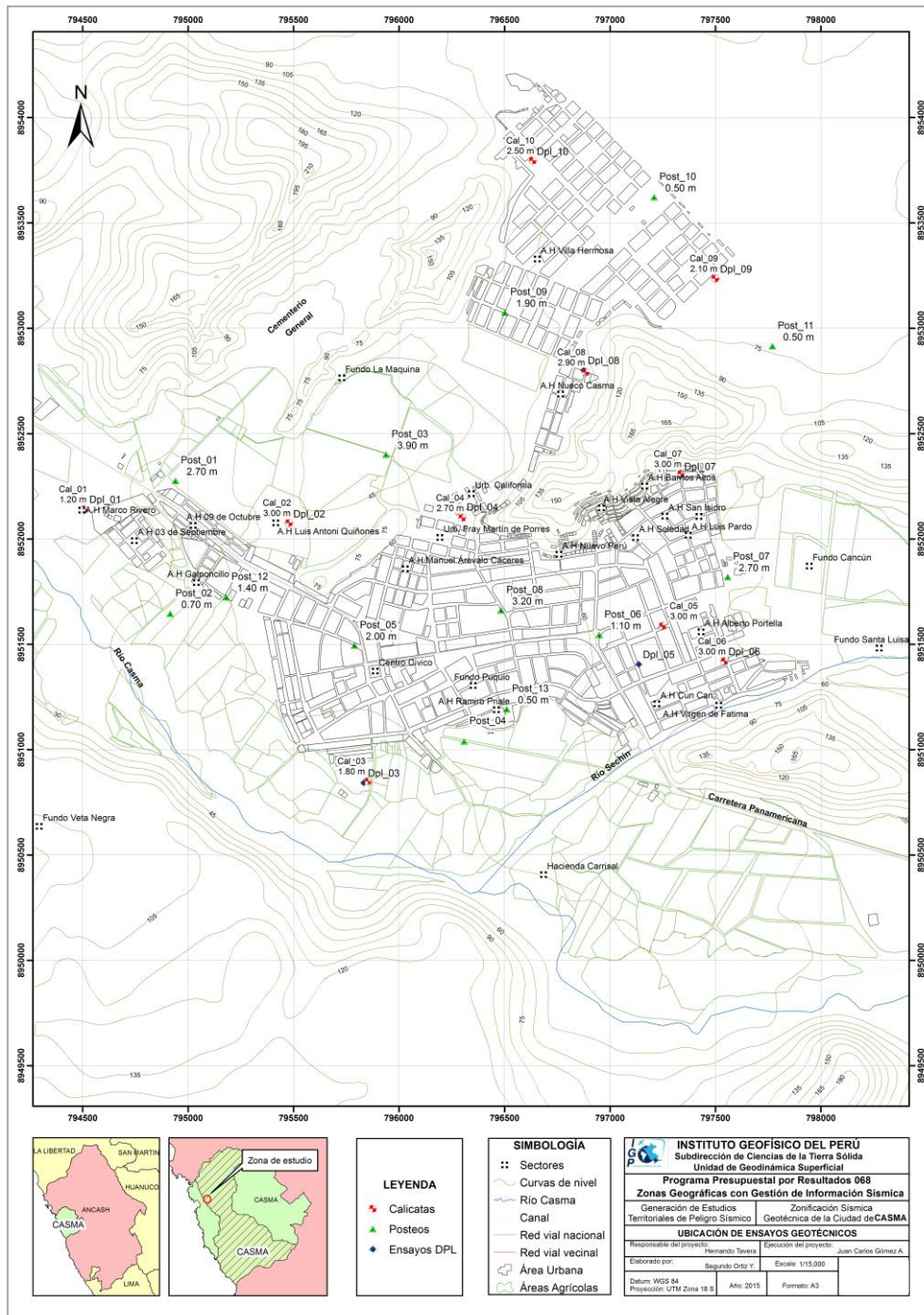


Figura 54: Mapa de ubicación de calicatas y posteos de suelos en la ciudad de Casma

Tabla 3: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Casma

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HÚMEDA (gr/cm <sup>3</sup> )	DENSIDAD SECA (gr/cm <sup>3</sup> )
C - 01	DC-C - 01	0.80	1.58	1.16
C - 02	DC-C - 02	3.00	2.25	2.20
C - 03	DC-C - 03	1.30	2.32	2.09
C - 04	DC-C - 04	2.70	2.06	2.00
C - 05	DC-C - 05	3.00	2.03	2.00
C - 06	DC-C - 06	3.00	2.39	2.36
C - 07	DC-C - 07	3.00	1.86	1.86
C - 08	DC-C - 08	2.90	2.10	2.05
C - 09	DC-C - 09	2.10	2.26	2.26
C - 10	DC-C - 10	2.50	2.26	2.26

**- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452):** A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 13 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 4), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 3.90 metros y la mínima del orden de 0.50 cm (ver Anexos). En los posteos 04 y 13, los suelos estaban conformados por gravas, en los posteos 10 y 11 (AAHH Villa Hermosa) los suelos estaban conformados por arenas sueltas y no era posible recuperar las muestras del barreno. En general, estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existe información geotécnica a fin de lograr una mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Casma.

**- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094):** Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 10 puntos dentro de la ciudad de Casma (Tabla 5). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 2.90 metros y mínima de 0.27 metros debido a que en muchos puntos los suelos están conformados por gravas y arenas de grano grueso que presentan ángulos de fricción de 31.46° y 39.7°, característicos de suelos sueltos a semicompactos e indican resistencia alta al corte.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en la ciudad de Casma

POSTEOS	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROF (m)	NIVEL FREÁTICO A (m)
Post - 01	794940	8952276	35	2.70	N.P.
Post - 02	794915	8951645	35	0.70	N.P.
Post - 03	795939	8952400	47	3.90	N.P.
Post - 04	796309	8951039	68	--	N.P.
Post - 05	795789	8951494	47	2.00	N.P.
Post - 06	796949	8951544	58	1.10	N.P.
Post - 07	797559	8951819	64	2.70	N.P.
Post – 08	796484	8951661	64	3.20	N.P.
Post – 09	796503	8953075	53	1.90	N.P.
Post – 10	797228	8953611	64	0.50	N.P.
Post – 11	7977760	8953012	64	0.50	N.P.
Post – 12	795180	8951723	39	1.40	1.40
Post - 13	796511	8951192	54	0.50	N.P.

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

DPL	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROF. (m)	# DE GOLPES	$\Phi$
DPL-01	794509	8952139	46	2.30	12	30.7
DPL-02	795483	8952081	51	0.27	45	39.7
DPL-03	795838	8950871	54	1.73	45	39.9
DPL-04	796300	8952094	59	0.34	45	39.7
DPL-05	797137	8951405	59	0.95	7	28.9
DPL-06	797543	8951418	78	0.75	45	39.7
DPL-07	797333	8952306	71	2.90	33	36.8
DPL-08	796879	8952801	76	0.34	45	39.7
DPL-09	797504	8953235	73	1.48	45	39.7
DPL-10	796634	8953793	71	0.98	45	39.7

Dónde:  $\phi$  = 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 Casma. Se ha identificado la existencia de 3 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 55 y Tabla 6):

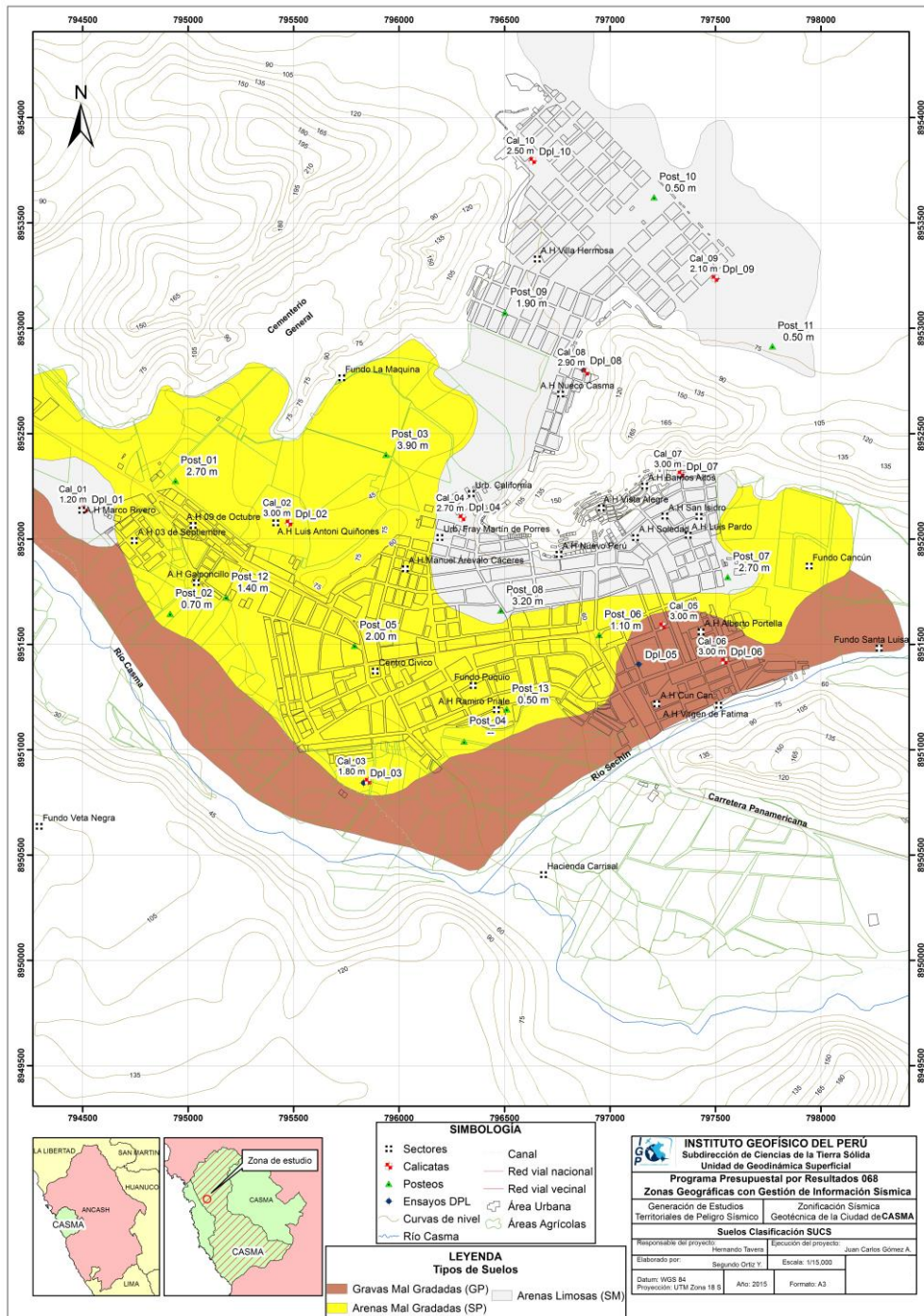


Figura 55: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Casma

Tabla 6: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Casma

CALICATA	PROF (m)	NF (m)	GRAVAS (>4.76)	ARENAS (>0.074mm, <4.76mm)	FINOS % (<0.074)	UNIFORMIDAD	CURVATURA	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	SUCS	DENOMINACIÓN
C - 01	1.20	1.20	0	94	6	-	-	NT	NP	-	6.50	SM	Arena fina, limosa
C - 02	3.00	NP	0.1	99.7	0.21	-	-	NT	NP	-	2.15	SP	Arena mal graduada
C - 03	1.80	1.80	3.6	94.8	1.61	-	-	NT	NP	-	10.13	SP	Arena mal graduada
C - 04	2.70	NP	18	70	12	-	-	NT	NP	-	3.40	SM	Arena fina, limosa
C - 05	2.00	NP	34.5	58.9	6.57	-	-	NT	NP	-	1.56	GP	Gravas mal graduadas
C - 06	3.00	NP	79	20	1	-	-	NT	NP	-	3.80	GP	Gravas mal graduadas
C - 07	3.00	NP	1.2	89.1	9.67	-	-	NT	NP	-	0.37	SM	Arena fina, limosa
C - 08	2.90	NP	0.6	91.8	7.56	-	-	NT	NP	-	2.33	SM	Arena fina, limosa
C-09	2.10	NP	14.1	77.9	7.98	-	-	NT	NT	-	0.14	SM	Arena fina, limosa
C-10	2.50	NP	8	88	4	-	-	NT	NT	-	2.90	SM	Arena fina, limosa

**.- Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas con un contenido de humedad de 0.14% a 6.50%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es baja. Son suelos de compacidad baja y no presentan plasticidad. Estos suelos se encuentran en un 34% del área de estudio y han sido identificados en los AAHH Villa Hermosa, Nuevo Casma, Nuevo Perú, Soledad, San Isidro, Marco Rivero, Urb. California y Fray Martín.

**.- Suelo tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas y con un contenido de humedad de 2.15 a 10.13%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es media. Son suelos de compactación media y no presentan plasticidad. Estos suelos se encuentran distribuidos en un 45% del área de estudio y han sido identificados en los AAHH 9 de Octubre, 3 de Septiembre, Galponcillo, área urbana de Casma, Nueva Libertad, Manuel Árevalo Cáceres, Ramiro Prialé, Fundo Puquio, Fundo Cancún y Fundo las Máquina.

**.- Suelos tipo GP:** Están conformados por gravas arenosas mal graduadas, presentan material granular mayor a 59% y su contenido de humedad es de 1.56% a 3.80%; por lo tanto, se consideran como suelos de compactación alto. No presentan plasticidad. Estos suelos ocupan el 21% de la superficie de la ciudad y han sido identificados en los AAHH Alberto Portella, Cun Can, Virgen de Fátima y Fundo Santa Luisa. Además, se encuentran en la margen derecha del río Casma y Sechín.

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

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

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

El resultado del análisis de diez (10) muestras extraídas de campo se muestran en la Tabla 7. Los resultados obtenidos muestran que los suelos de la zona urbana de Casma muestran cohesión baja; es decir, la consistencia de sus suelos es muy blanda a blanda y los valores de fricción interna superan los 27°, característico de arenas mal graduadas y limos.

Tabla 7: Resultados del ensayo de corte directo

MUESTRA	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA DEL SUELO (°)	COHESIÓN APARENTE DEL SUELO (Tn/m <sup>2</sup> )	DENSIDAD NATURAL (Tn/cm <sup>3</sup> )
C - 01	27.80	0.10	N.P.
C - 02	34.60	0.10	N.P.
C - 03	34.20	0.00	N.P.
C - 04	31.00	0.10	N.P.
C - 05	36.80	0.00	1.97
C - 06	36.80	0.00	1.97
C - 07	34.60	0.10	N.P.
C - 08	31.00	0.10	N.P.
C - 09	28.30	0.10	N.P.
C - 10	28.30	0.10	N.P.

### 10.3.- Capacidad de carga admisible

Los resultados obtenidos de los ensayos de corte directo (ángulo de fricción y la cohesión), han permitido calcular con la ayuda de fórmulas empíricas la capacidad de carga última de los suelos (mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico). En base a esta última se obtiene la capacidad de carga admisible que resulta al ser multiplicado por un factor de seguridad, cuyo valor es de 1/3, de acuerdo a la norma técnica peruana para el diseño de cimentaciones.

Para el área urbana de la ciudad de Casma, 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 ocho puntos analizados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Capacidad de carga admisible de diez (10) muestras extraídas en la ciudad de Casma

MUESTRA	CAPACIDAD DE CARGA ULTIMA (Tn/m <sup>2</sup> )	CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE (Kg/cm <sup>2</sup> )
C - 01	43.23	1.44
C - 02	69.29	2.31
C - 03	43.23	1.44
C - 04	69.29	2.31
C - 05	69.29	2.31
C - 06	173.75	4.34
C - 07	69.29	2.31
C - 08	47.48	1.58
C - 09	47.38	1.58
C - 10	47.48	1.58

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

Considerando la clasificación de la Tabla 9, para la ciudad de Casma se ha diferenciado los suelos de acuerdo a su capacidad de carga admisible en (Figura 56):

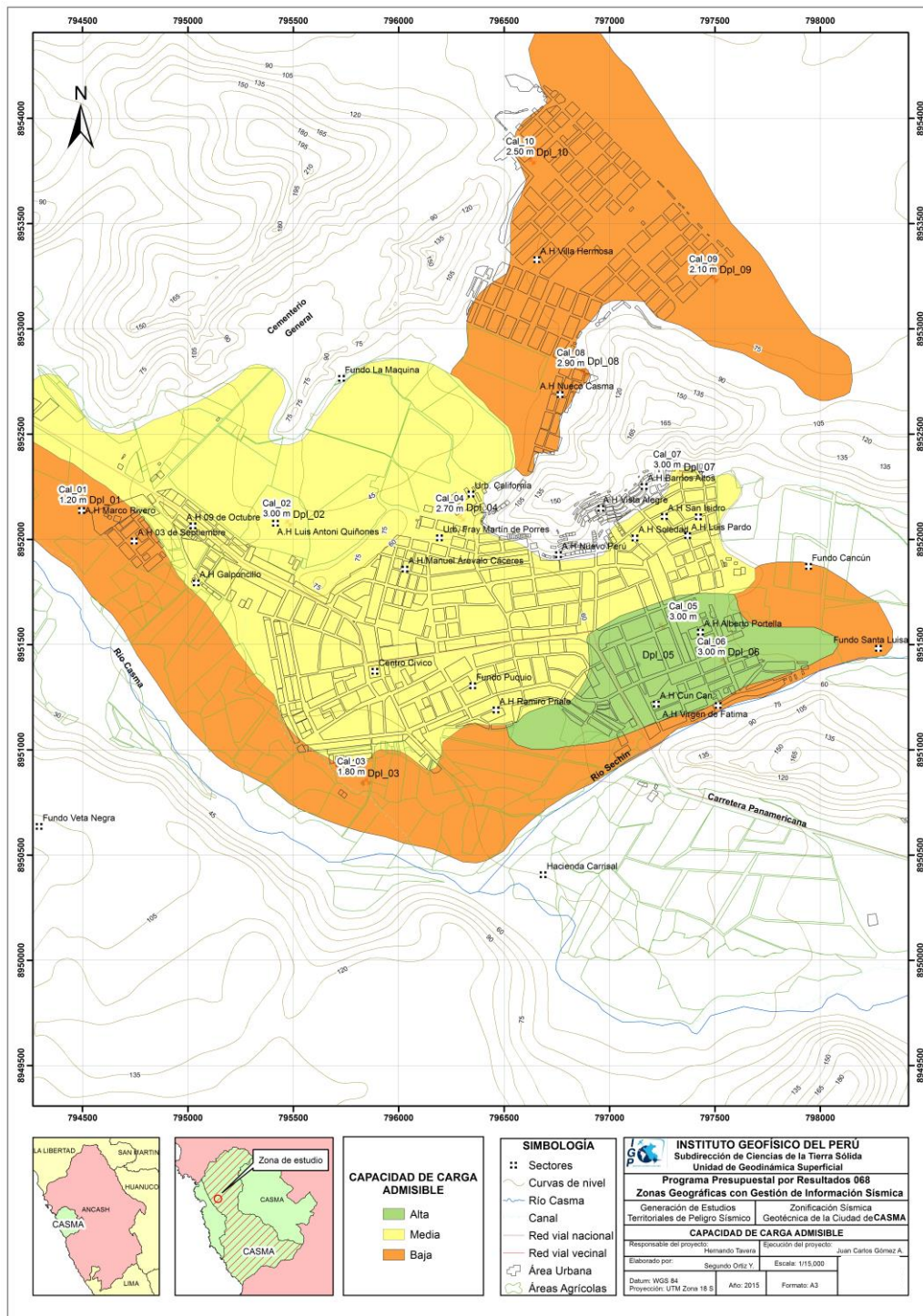


Figura 56: Mapa de capacidad de carga admisible en la ciudad de Casma

**.- Capacidad de carga admisible baja:** Considera suelos sueltos a medianamente compactos, los mismos que se distribuyen sobre un 48% de la superficie del área de estudio. Sobre este tipo de suelos se encuentran asentados los AAHH Marco Rivero, 3 de Septiembre, Nueva Libertad, Virgen de Fátima, Nuevo Casma y Villa Hermosa. Además, de los fundos de Santa Luisa y Cancún.

**.- Capacidad de carga admisible media:** Considerada a los suelos moderadamente compactos distribuidos en un 45% de la superficie del área de estudio. Sobre este tipo de suelos se encuentran asentados los AAHH 9 de Octubre, Galponcillo, Luis Antoni Quiñones, Manuel Arévalo Cáceres, Ramiro Priolé, Soledad, San Isidro, Luis Pardo, además las Urb. California y Fray Martín de Porres y finalmente, el 100% del área urbana de la ciudad de Casma.

**.- Capacidad de carga admisible alta:** Considera los suelos compactos distribuidos en un 7% del total de la superficie del área de estudio. Sobre estos suelos se sitúan los AAHH Alberto Portella y Cun Can.

#### **10.4.- Análisis de elementos expuestos**

Según Lavell (2013), como elementos expuestos se debe considerar al grupo de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructuras que por su localización pueden ser afectados ante la manifestación de una amenaza y/o peligro. El establecimiento de infraestructuras, bienes y recursos en zonas susceptibles a la ocurrencia de algún peligro de origen natural, como las inundaciones acontecidas en la ciudad de Casma, se debe a diversos motivos tanto económicos, sociales y físicos-espaciales.

En el presente capítulo, se analiza el crecimiento y desarrollo de Casma bajo los contextos sociales y físicos-espaciales. Para ello, fue necesario conocer los primeros asentamientos humanos que conformaron la ciudad y las implicancias del peligro por inundación acontecida en ella a lo largo de la prehistoria e historia. Asimismo, se analiza la relación entre el proceso de expansión urbana y la ocupación de áreas expuestas al peligro citado, a partir de un análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales Landsat de los años de 1990 y 2006.

La descripción de las inundaciones suscitadas y el análisis del emplazamiento urbano en áreas expuestas a este evento, permitirá comprender dos interrogantes ¿Por qué el uso y ocupación de espacios territoriales expuestos? y ¿Qué se espera en el futuro?.

#### **10.4.1.- Primeros asentamientos y eventos pasados**

Para este análisis, se tomó en cuenta una reconstrucción prehistórica e histórica del primer asentamiento poblacional en Casma y la predisposición ante las inundaciones a lo largo de su crecimiento y desarrollo.

Los primeros hombres que habitaron Casma, provinieron del norte hace aproximadamente 8000 años, evidenciándose por las distintas herramientas líticas encontradas en cerro Prieto. Posteriormente ocuparon Huaynuná, Tortugas, Bahía Seca, Mongoncillo, Playa Grande, entre otros. En un inicio estos hombres se dedicaban exclusivamente a la caza, posteriormente se desarrollaron como agricultores (de manera incipiente), hecho que conllevó al sedentarismo y la formación de sociedades. Prueba de ello es la Plaza Circular hundida de Sechín Bajo (5500 años) y los templos de Sechín Alto, Taukachi – KonKan, Pampa de las Llamas, entre otros. Posteriormente, sobrevinieron las culturas preincaicas como Chavín (influyendo a través de ciudadelas como pallka, San Diego y Chankillo), Wari y Chimú (en ese orden cronológico), hasta la conquista de los incas y los españoles respectivamente.

Las ciudadelas establecidas en Casma fueron conquistada por distintas culturas preincaicas, los Chimú fueron los últimos en ocupar dicho lugar (entre los 900 y 1470 d.C.) antes de la llegada de los Incas. Paralelo a este acontecimiento social, Craig y Shimada (1986) señalan una enorme inundación bautizada como “Nyamlap Flood” ocurrido probablemente alrededor del año 1330 d.C., en el valle del río Moche a causa del fenómeno El NIÑO. Wells (1987; 1990) por su parte, fecha una gran inundación histórica en el valle del río Casma en 1330 +/- 35, que podría asociarse al Nyamlap Flood, evento que permitió la expansión imperial Chimú (postulado de Klauer, 2005).

A finales del siglo XVI e inicios del siglo XVII, durante el virreinato de Luis de Velasco y Castilla (1596 y 1604), Santo Toribio de Mogrovejo en una de sus

visitas pastorales al norte del Perú, hace hincapié de la existencia de Casma la Alta y la Baja, la primera llamada San Ildefonso ubicada en la margen izquierda del río Grande, a 3 km valle arriba desde la confluencia de este último con Sechín, y la segunda ubicada en la actual ciudad.

En 1857 el Mariscal Castilla declara a Casma como la capital de la provincia de Santa, con el título de villa. 34 años después, Pedro Ferradas (2000) indica que este lugar quedó en ruinas por el acontecimiento de una gran inundación. Otro evento trascendental en la historia de Casma es lo acontecido en marzo de 1925, donde el desborde del río Sechín había destruido todo a su paso, sus aguas alcanzaron el metro de altura y avanzaban por el centro de la ciudad hasta la calle Tamarindo (actual av. Magdalena) donde se ubica la capilla de Santa María Magdalena. Figura 57.



Figura 57: Ubicación de la capilla Santa María Magdalena y Límite máximo de inundación del evento de 1925

Luego de los años 50, los procesos de explosión demográfica y migraciones hacia las zonas urbanas se agudizaron en el país, estos acontecimientos implicaron la búsqueda y ocupación de nuevos espacio territoriales, muchos de ellos expuestos a la ocurrencia de algún peligro de origen natural. En Casma, el proceso de expansión urbana fue predominante hacia el lado noroeste de la ciudad, los nuevos asentamientos se establecieron en las laderas de los cerros y en las zonas próximas al cauce del río Sechín. Estos últimos fueron afectados por las posteriores inundaciones ocurridas en los años de 1983 y 1998.

**- Expansión urbana:** Se procede a analizar el emplazamiento urbano de la ciudad de Casma, a partir del uso de imágenes satelitales Landsat de los años 1990 y 2006 mostradas en las Figuras 58 y 59.

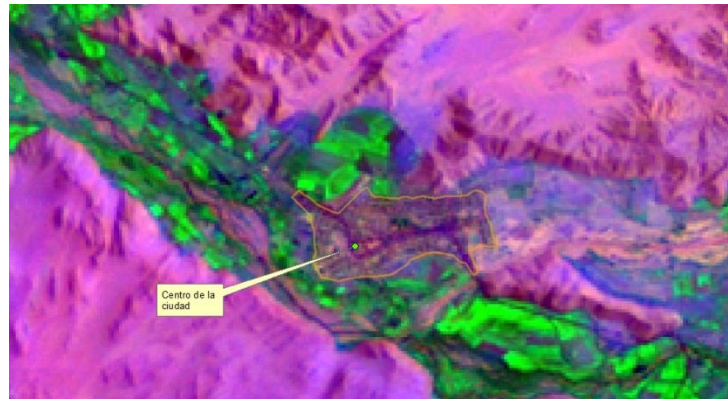


Figura 58. Imagen satelital Landsat TM de 1990. Área urbana delimitada a partir de la combinación de bandas espectrales 7, 4, 2

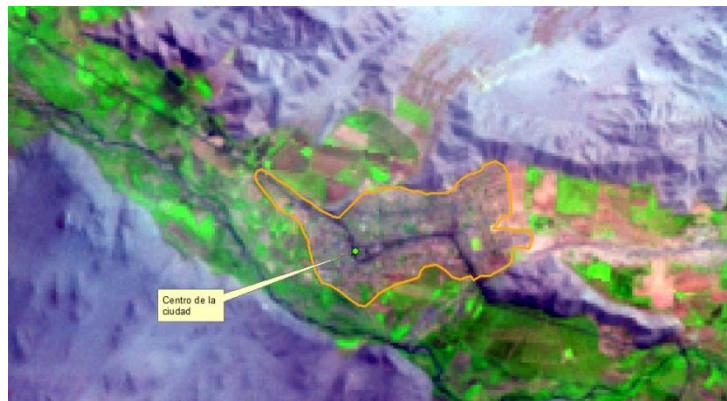


Figura 59. Imagen satelital Landsat ETM de 2006. Área urbana delimitada a partir de la combinación de bandas espectrales 4, 5, 7

Comparando las imágenes de 1990 y 2006, se observa que el área urbana de 1990 y 2006 fue de 142 y 231 hectáreas respectivamente. Ello indica una expansión poblacional del 62 % en 16 años. En los cuadros 13 y 14 se describen algunos datos estadísticos del crecimiento urbano). Asimismo, el mayor porcentaje de expansión urbana de la ciudad de Casma, se realizó en dirección NE desde el centro de la ciudad, principalmente sobre las zonas de ladera y áreas muy cercanas al cauce del río Sechín, esto debido básicamente a factores como:

**Factores sociales:** El crecimiento poblacional de Casma de más de 20000 habitantes y 6000 viviendas en 16 años, conllevó a la búsqueda de nuevos espacios territoriales que no repercuta en gastos mayores a la población emigrante. Por ejemplo, el precio del terreno, privatización, escasos ingresos económicos familiares, entre otros. A consecuencia de estas limitaciones, se observa el asentamiento poblacional en áreas expuestas a la ocurrencia de peligros por inundación o caída de rocas.

**Factor físico – espacial:** Está asociado a las limitaciones del crecimiento urbano por factores o elementos físicos tales como colinas, montañas, ríos, entre otros. Tal como se observa en los lados oeste y sur de la ciudad y que han intervenido desde el primer asentamiento poblacional.

## 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 Casma.

### 11.1.- Estudio sísmico con la técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica, sobre el mapa catastral de la ciudad de Huaral se procedió 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 60 se muestra la distribución espacial de los 282 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 61 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto CA-126. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 20 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes a 1.93 Hz y 5.2 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces respecto al nivel de referencia. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

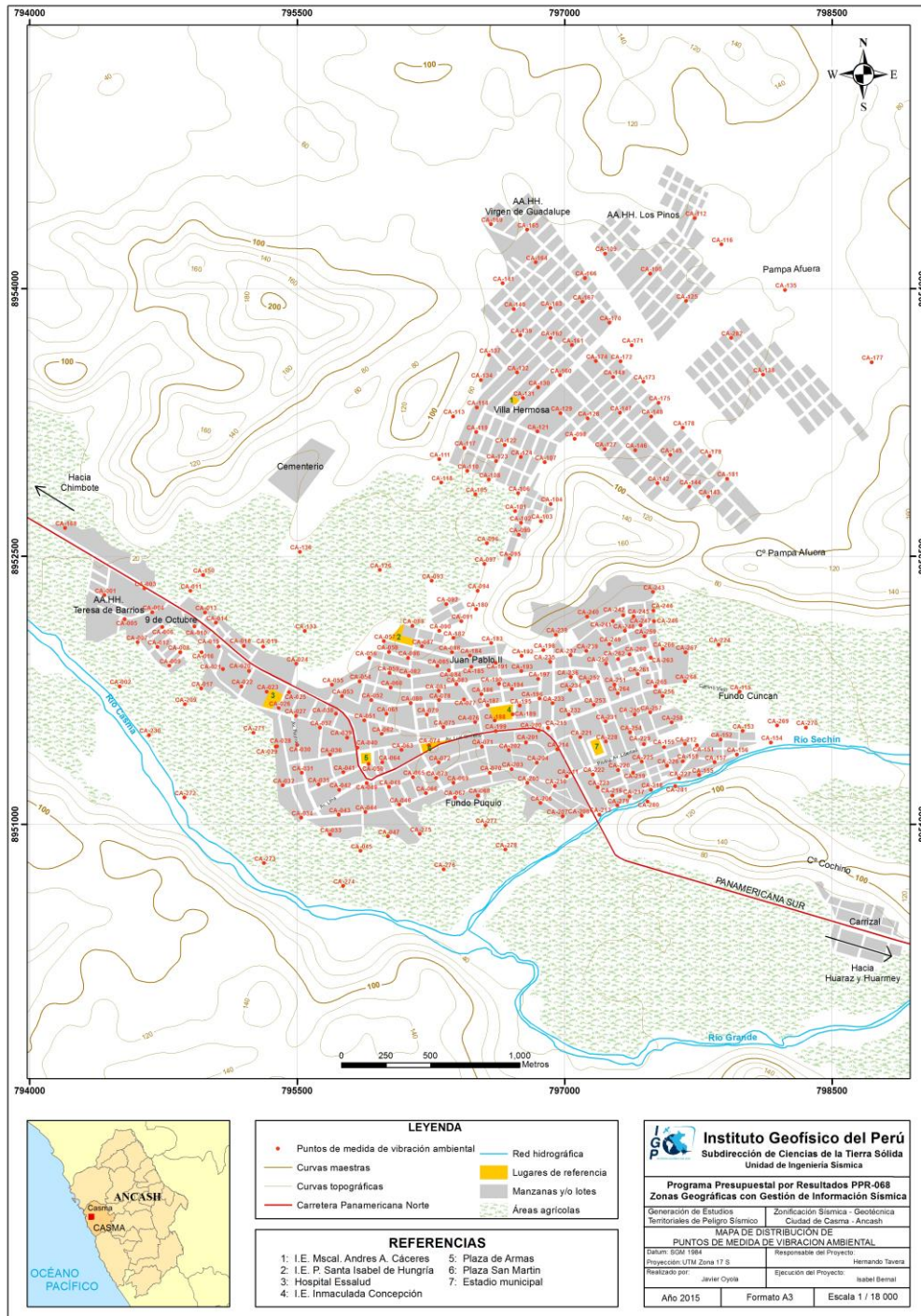


Figura 60: Mapa de la ciudad de Casma y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

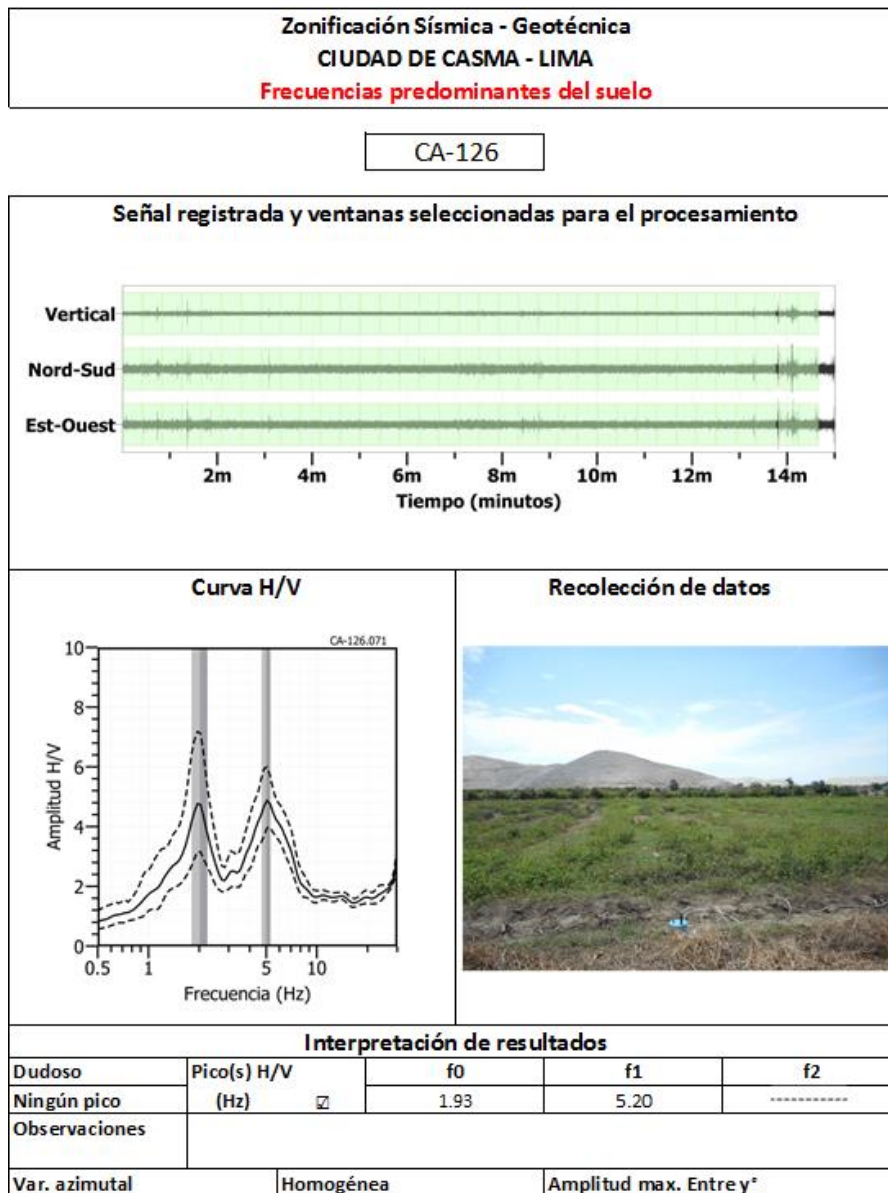


Figura 61: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CA-126 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

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

En general, para el análisis de la información se debe considerar los siguientes aspectos: 1) Las frecuencias predominantes menores a 1 Hz corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, y/o cambios meteorológicos (periodos muy largos), 2) Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos y 3) Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor (Bernal, 2006).

La información obtenida para las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis dos rangos de frecuencia: **F<sub>0</sub> (F<2.0Hz)** y **F<sub>1</sub> (F≥2.0)** en razón que en un 10% de los puntos de medición se ha identificado la presencia de dos picos de frecuencias y en algunos casos, hasta tres picos con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Casma.

***.- Frecuencias predominantes F<sub>0</sub>:** De acuerdo a la Figura 62 y sobre el 60% de puntos donde se recolecto información, se observa que este rango de frecuencias se distribuye de manera aleatoria en todo el área de estudio, con amplificaciones de hasta 5 veces en las inmediaciones del río Sechin y en la zona norte del distrito, AA. HH. Villa Hermosa.*

*En la Figura 63, se muestra ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos CA-79, CA-115 y CA-126, el primero en la zona céntrica, en el extremo oeste de la institución educativa Inmaculada Concepción, el segundo en el extremo E, por el asentamiento humano Vista Alegre, y tercer punto en la zona Oeste, en dirección al Cementerio de Casma; en todos sobresalen las frecuencias de 1.6 y 1.8 Hz con amplificaciones de hasta 5 veces.*

***.- Frecuencias predominantes F<sub>1</sub> (2.0≤F≤10.0Hz):** De acuerdo a la Figura 64, dentro de este rango se observa que los valores de frecuencia se distribuyen de manera aleatoria sobre un 90% de puntos donde se recolecto información. En la zona céntrica de Casma predominan valores que fluctúan de entre 5.0 a 7.0 Hz, y conforme se tiende hacia la Panamericana Norte, los valores disminuyen entre 2.0 a 4.0 Hz. Hacia el extremo Norte de esta localidad, sobre el A.H. Villa Hermosa, las frecuencias fluctúan entre 2.0 a 4.0 Hz, para luego incrementarse en los alrededores de esta zona. En la margen oeste y sur del cerro en la*

proximidad del A. H. Alto Perú, se presentan valores de frecuencia entre 6.0 a 10 Hz.

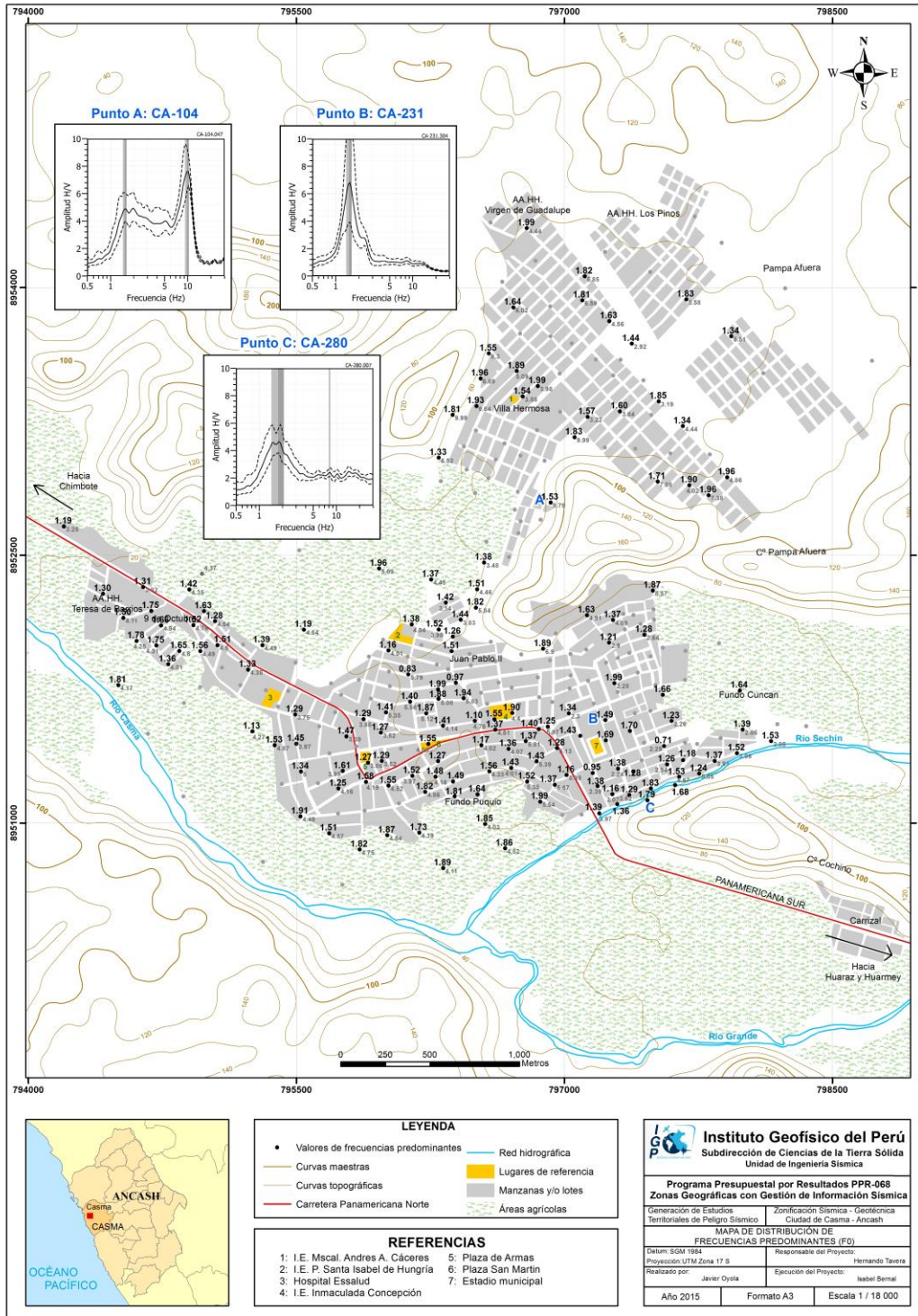
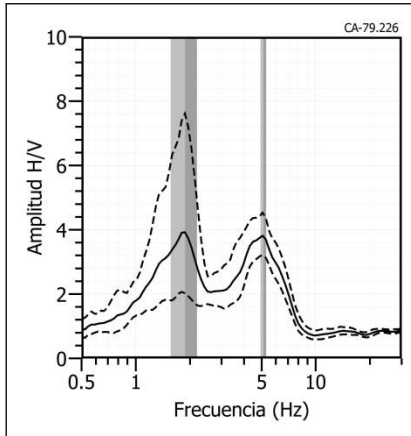
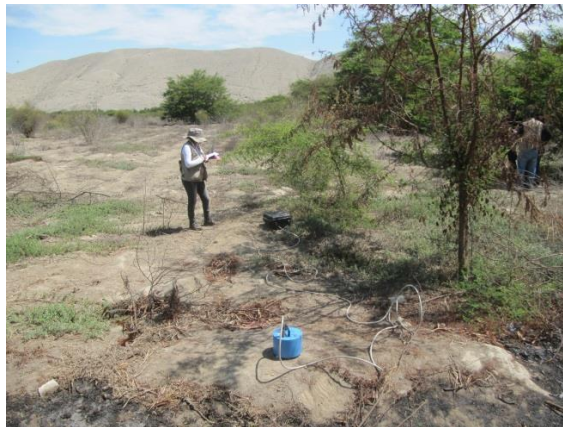
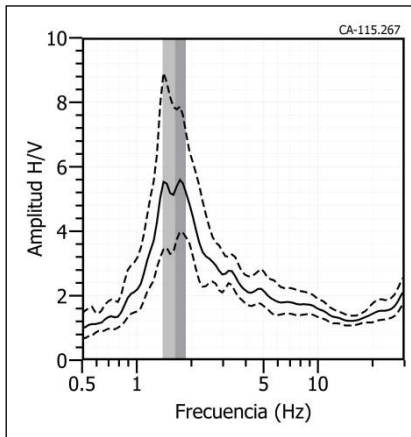


Figura 62: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes en el rango de  $F_0$  ( $F < 2.0$ Hz).

**CA-79**



**CA-115**



**CA-126**

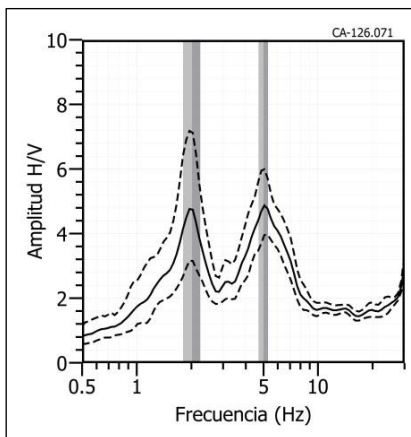


Figura 63: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango  $F_0$  ( $F < 2.0\text{Hz}$ ). Para los puntos CA-79, CA-115 y CA-126, ubicado en la zona céntrica, el segundo en el extremo E, y el tercer punto en la zona oeste del área de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

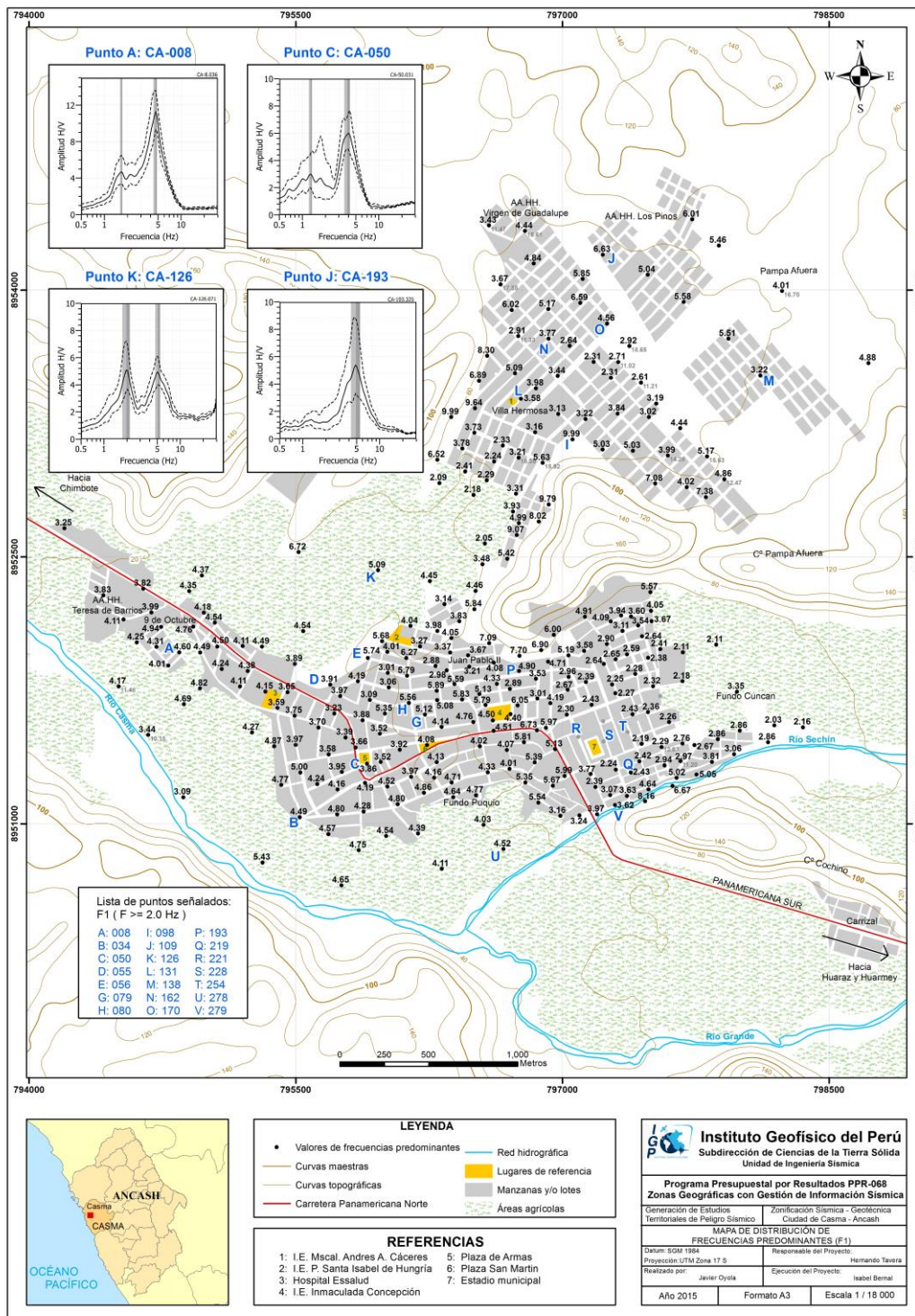


Figura 64: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F1 ( $F \geq 2.0$ ).

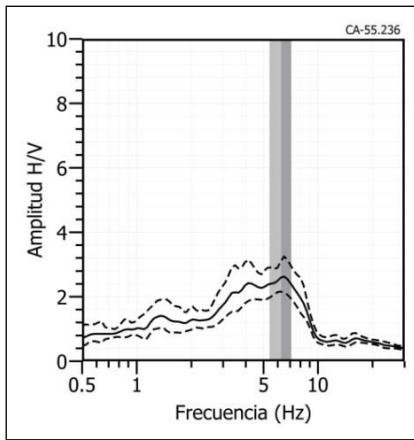
*En el valle ubicado entre el río Casma y el cerro de la margen izquierda, cerca al club Las Poncianas, se identifican frecuencias entre 3.0 y 5.0 Hz, con amplificaciones mayores a 5. Estos resultados evidencian la gran flexibilidad de los suelos en este rango de frecuencia.*

*En la Figura 65, se muestran ejemplos de razones espectrales características de diversas zonas. Por ejemplo, para los puntos ubicados hacia el sector central de la ciudad de Casma, se considera las razones obtenidas para los puntos CA-55, CA-56, CA-187, donde sobresalen frecuencias que fluctúan entre 5.0 a 7.0 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 3 veces. Los puntos ubicados al oeste del centro de la ciudad, por el club las Poncianas, considera las razones obtenidas para los puntos CA-08, CA-09 y CA-27, donde sobresale un pico bien definido a frecuencias de 4.6, 4.1 y 3.7 Hz con amplificaciones máximas relativas de 11.1, 8.2 y 6.7 veces respectivamente. Además, de esta frecuencia se observa una perturbación de la curva a frecuencias que fluctúan entre 1.2 a 1.6 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces.*

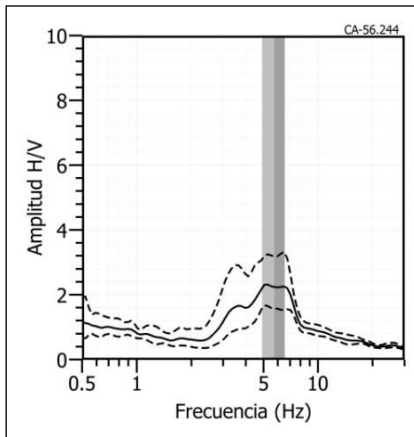
*Hacia el extremo SE de la localidad de Casma, cerca de la ribera del río Sechín se considera las razones obtenidas para los puntos CA-157, CA-217 y CA-218, donde sobresalen frecuencias de 1.3, 1.2 y 1.8 Hz, con amplificaciones máximas relativas de 2.4, 4.2, 4.9 veces respectivamente y un segundo pico, a frecuencias de 3.8, 3.6 y 4.6 Hz con amplificaciones de al menos 5 veces. Así mismo, sobresale una perturbación a 10Hz con amplificaciones de al menos 2 veces. Los puntos CA-109, CA-138 y CA-162 ubicados en el extremo Norte, sobre la urbanización Villa Hermosa, sobresalen frecuencias de 6.6, 3.1 y 3.7 Hz, con amplificaciones de hasta 4 veces.*

Los resultados obtenidos para la ciudad de Casma indican que los suelos son dinámicamente estables. Se observa el predominio del rango de frecuencias entre 2.0 a 10.0 Hz; que evidencia la presencia de una capa de suelo de mediano espesor y otra de menor espesor definida con las frecuencias mayores a 10 Hz, distribuidas de manera aleatoria por toda la ciudad. Además, hacia el norte y al este del estadio municipal, resalta la ausencia de frecuencias predominantes en el rango de F1.

**CA-55**



**CA-56**



**CA-187**

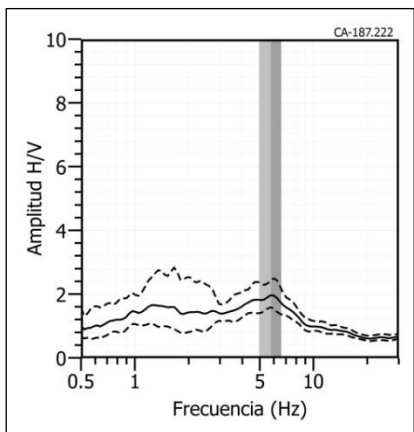
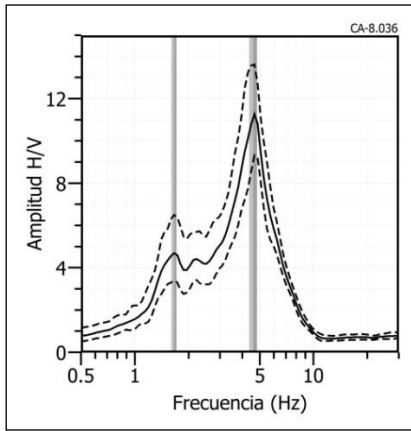
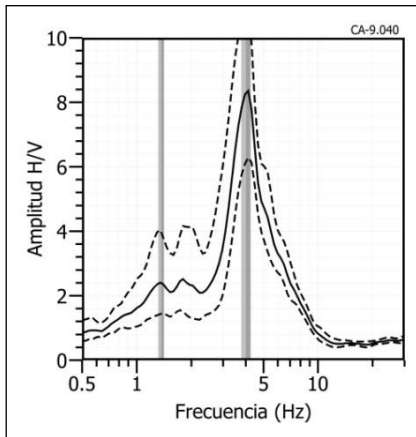


Figura 65: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \geq F < 10.0$  Hz). Para los puntos CA-55, CA-56 y CA-187, ubicados en el sector central del distrito de Casma. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CA-08**



**CA-09**



**CA-27**

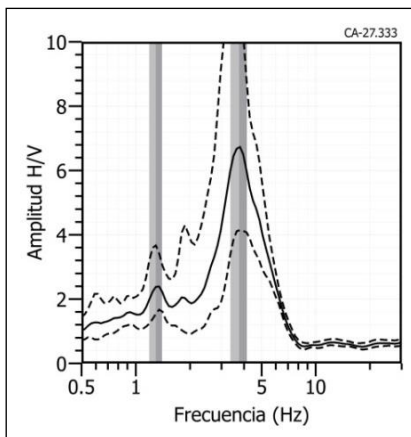
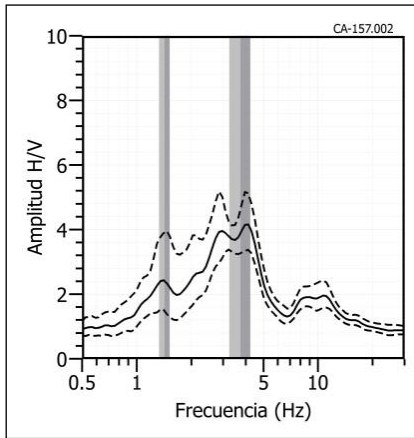
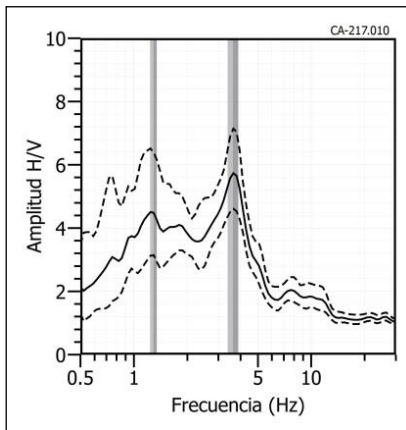


Figura 65: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \geq F < 10.0$ Hz). Para los puntos CA-08, CA-09 y CA-27, ubicados al oeste del centro de la localidad, por el club Las Poncianas. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CA-157**



**CA-217**



**CA-218**

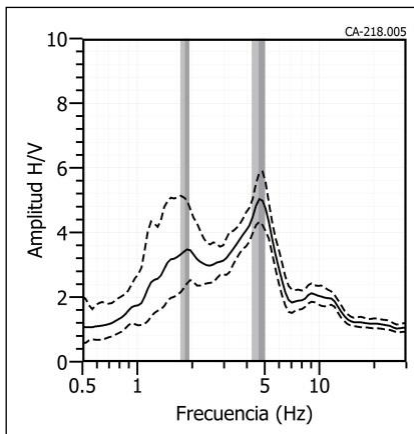
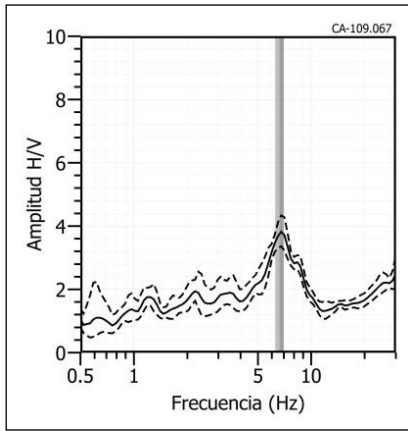
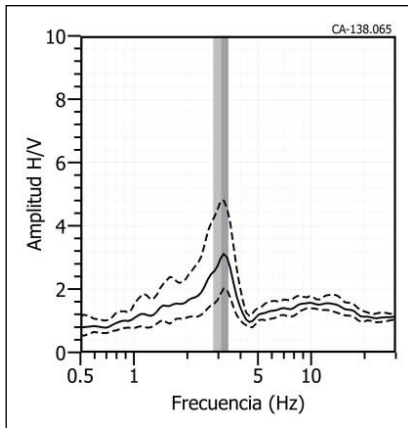


Figura 65: ...Continuación.../Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ( $2.0 \geq F < 10.0$ Hz). Para los puntos CA-157, CA-217 y CA-218, ubicados cerca de la ribera del río Sechín. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**CA-109**



**CA-138**



**CA-162**

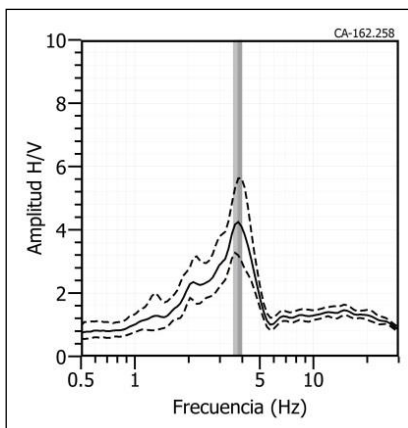


Figura 65: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1( $2.0 \geq F < 10.0$ Hz). Para los puntos CA-109, CA-138 y CA-162, ubicados en el extremo Norte, sobre la urbanización Villa Hermosa. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

## 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.

En la Figura 66, se presenta el mapa de la ciudad de Casma con la distribución espacial de 10 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-CA., LS10-CA, y en la Tabla 10 se presentan las coordenadas de cada línea. En la Figura 67, se presenta algunas observaciones importantes hechas campo, tal es el caso del AAHH Villa Hermosa, donde se observa la presencia de un afloramiento de roca intrusiva que se encuentra próxima a la Línea LS10-CA (Figura 67a), en el asentamiento humano Teresa de Barrios, se observó en superficie la presencia de suelos húmedos, los cuales fueron anteriormente considerados como zonas de cultivo y en los cuales se realizó las líneas sísmicas LS01-CA y LS02-CA (Figura 67b). Asimismo, se observó la presencia de depósitos aluviales en el lugar de emplazamiento de las líneas sísmicas LS03-CA a LS08-CA (Figura 67c), finalmente, en el lugar de emplazamiento de las líneas LS09-CA y LS10-CA, se encontraron depósitos de arena (Figura 67d).

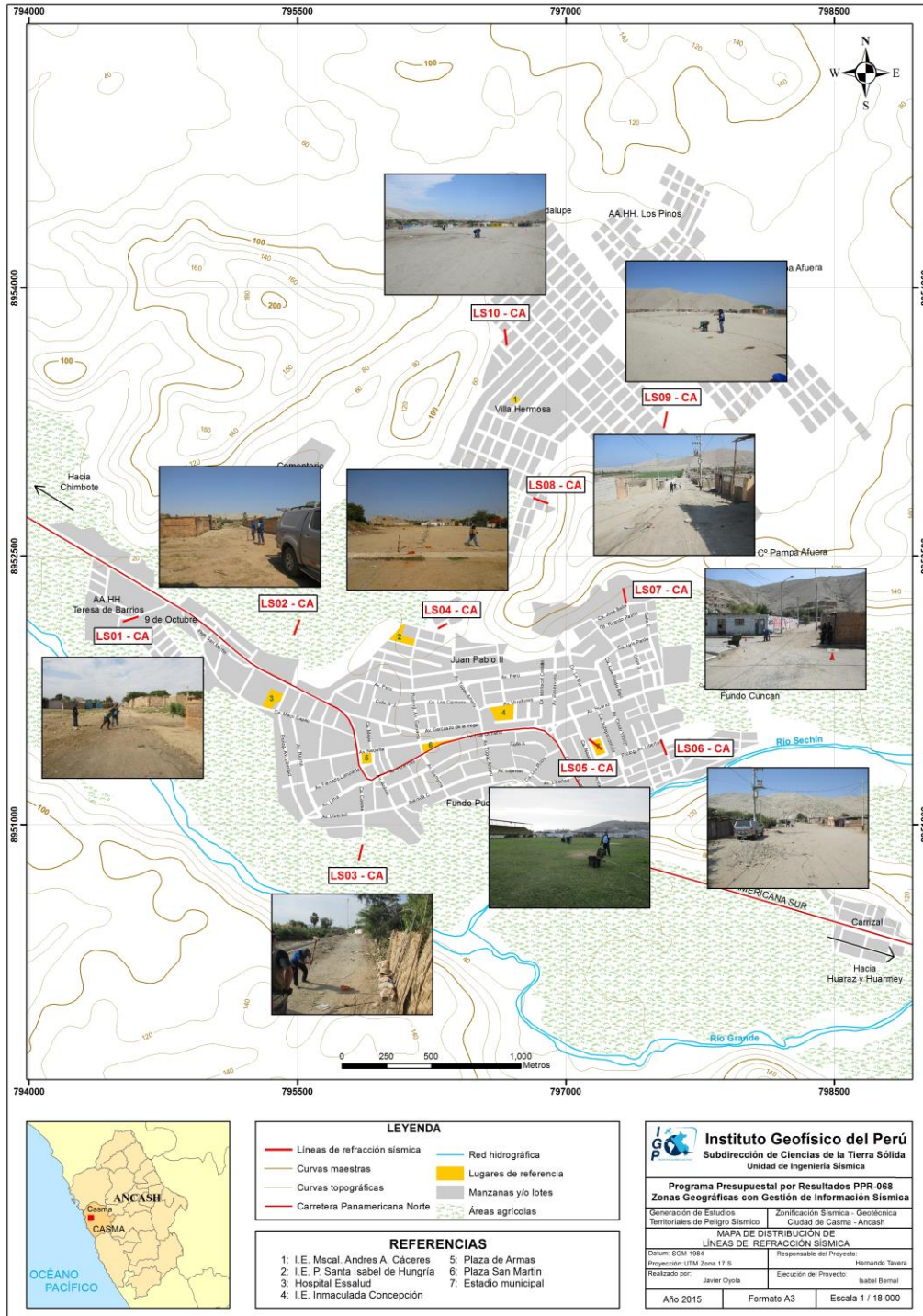


Figura 66: Mapa de la ciudad de Casma y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-CA...,LS10-CA.

Tabla 10: Coordenadas y parámetros utilizados en cada línea sísmica

Línea Sísmica	Este (m)	Sur (m)	Cota (m)	Espaciamiento entre geófonos (m)	Longitud total de registro (m)
LS01-CA	794611	8952161	42	4	92
	794523	8952132	40		
LS02-CA	795480	8952059	59	4	92
	795511	8952145	58		
LS03-CA	795861	8950887	50	4	92
	795841	8950794	49		
LS04-CA	796285	8952094	61	2.5	57.5
	796336	8952121	62		
LS05-CA	797199	8951419	61	4	92
	797127	8951475	61		
LS06-CA	797530	8951474	56	4	92
	797562	8951387	56		
LS07-CA	797336	8952235	84	4	92
	797319	8952322	89		
LS08-CA	796817	8952824	64	4	94
	796901	8952792	71		
LS09-CA	797547	8953215	75	4	92
	797565	8953306	75		
LS10-CA	796669	8953679	83	4	92
	796657	8953770	88		

Para el análisis de los resultados obtenidos en este estudio se considera la clasificación que la Norma E.030 establece para cada tipo de suelo; sin embargo, para una mejor clasificación de los suelos, se ha visto por conveniente agregar una subdivisión para los "suelos duros" a fin de considerar dos clasificaciones adicionales, "suelos moderadamente duros" y "suelos duros", según el siguiente detalle:

- .- Suelos blandos, velocidades  $V_s < 180$  m/s
- .- Suelos duros, velocidades  $V_s 180$  a  $500$  m/s
  - . Suelos moderadamente duros, velocidades  $180$  a  $350$  m/s
  - . Suelos duros, velocidades  $350$  a  $500$  m/s
- .- Suelos muy duros o roca blanda, velocidades  $V_s 500$  a  $800$  m/s
- .- Rocas moderadamente duras, velocidades  $V_s 800$  a  $1500$  m/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 Casma (Figura 68).

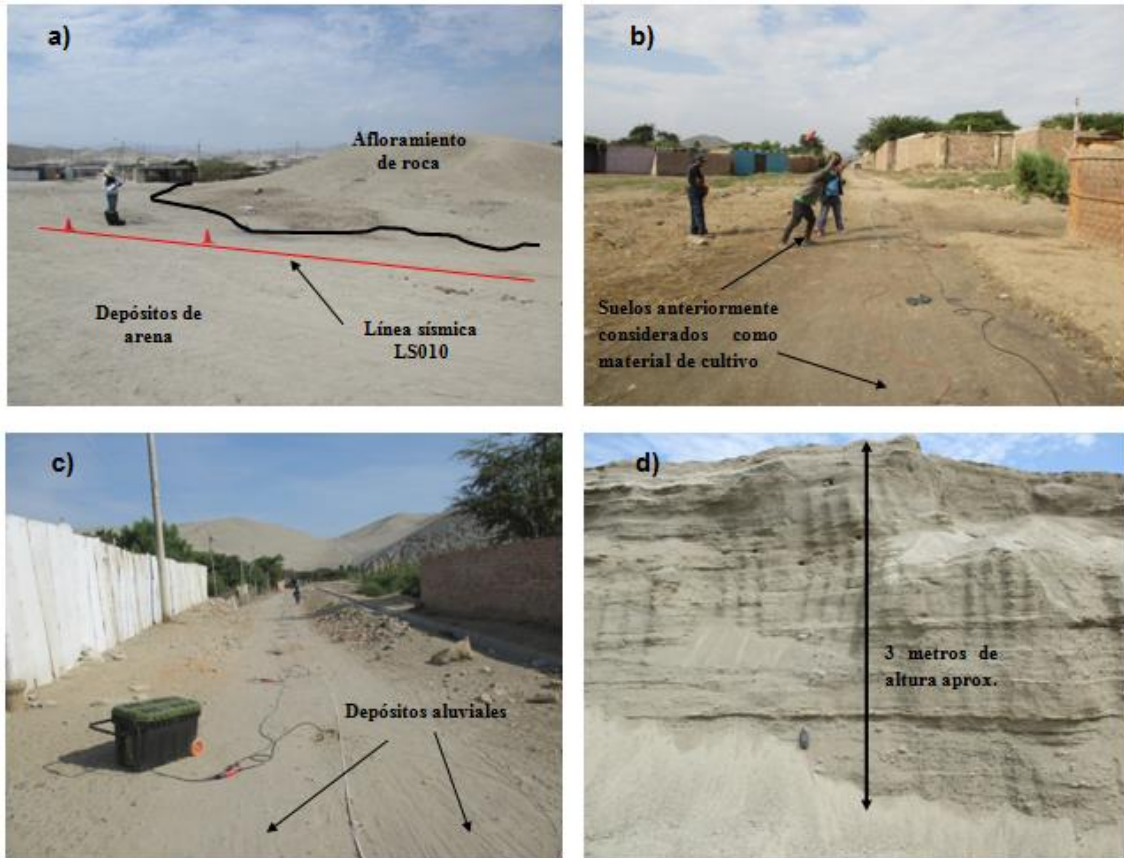


Figura 67. Imágenes de los diferentes puntos en donde se obtuvieron datos sísmicos con la técnica de arreglos sísmicos

**.- Línea Sísmica LS01-CA:** Línea sísmica realizada en el asentamiento humano Teresa de Barrios, ubicado en el extremo oeste de la ciudad de Casma. El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas con espesores de 7 y 11 metros, y con velocidades  $V_s$  de 185 m/s y 340 m/s, los mismos que corresponden a suelos moderadamente duros y suelos duros, para la primera y segunda capa respectivamente. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades mayores a 462 m/s y corresponde a suelos duros (Figuras 68a).

**.- Línea sísmica LS02-CA:** Línea sísmica fue realizada a 300 metros de la Iglesia Santa María (en dirección NE). El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas de 4 y 7 metros de espesor, y con velocidades  $V_s$  de 145 m/s y 234 m/s, correspondientes a suelos blandos y suelos moderadamente duros, para la primera y segunda capa respectivamente.

La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades de 577 m/s, que sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 68b).

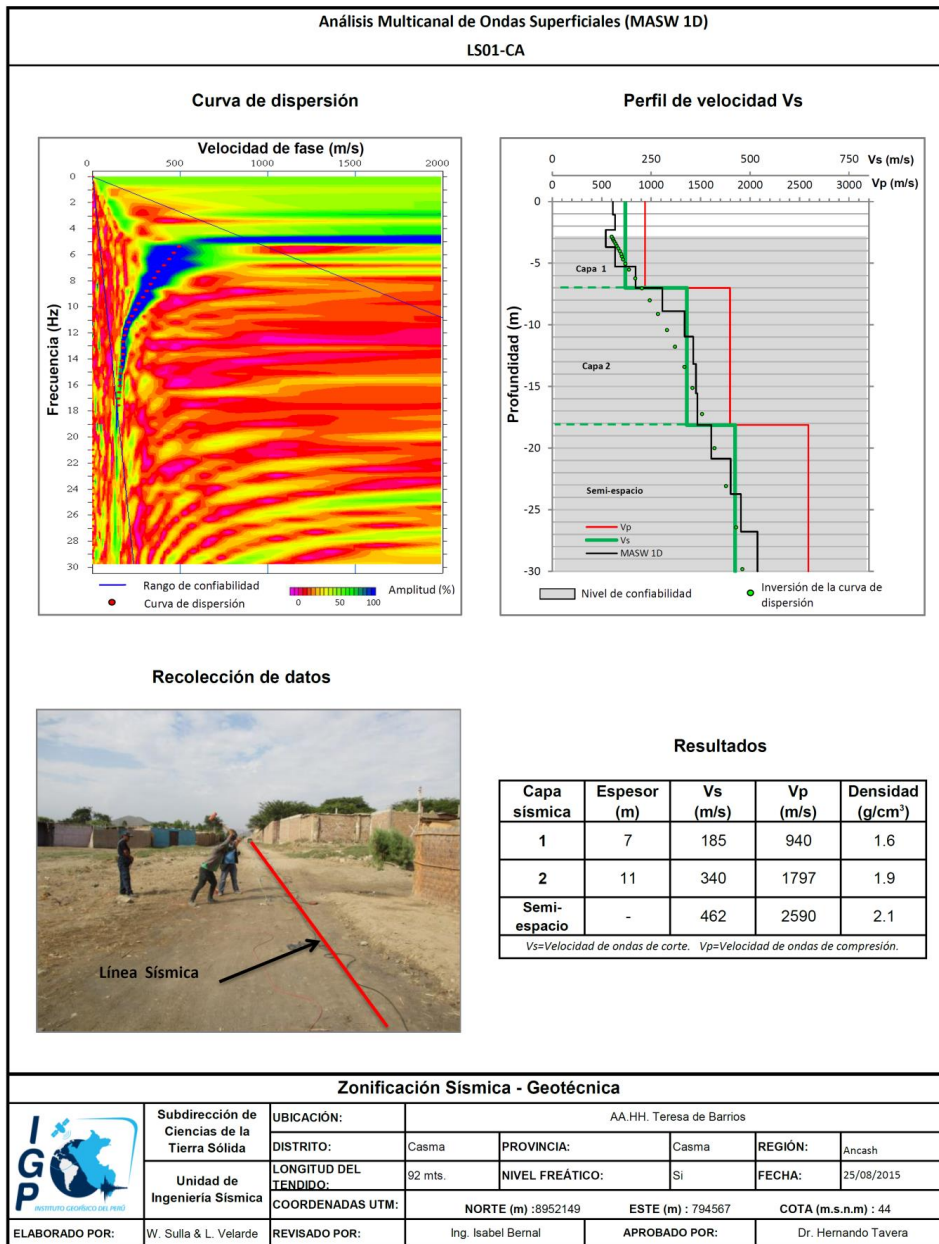


Figura 68.a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS01-CA.

**.- Línea sísmica LS03-CA:** Línea sísmica realizada en la prolongación de la calle Casma, ubicada en una zona denominada El Pedregal. El perfil de velocidad Vs muestra resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas de 7 y 11 metros de espesor, y con velocidades Vs de 220 m/s y 415 m/s, para primera y segunda capa respectivamente, valores que sugieren suelos

moderadamente duros para la capa superficial asentada sobre una capa de suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio presenta una velocidad  $V_s$  de 577 m/s y estaría conformada por suelos muy duros o roca blanda (Figura 68c)

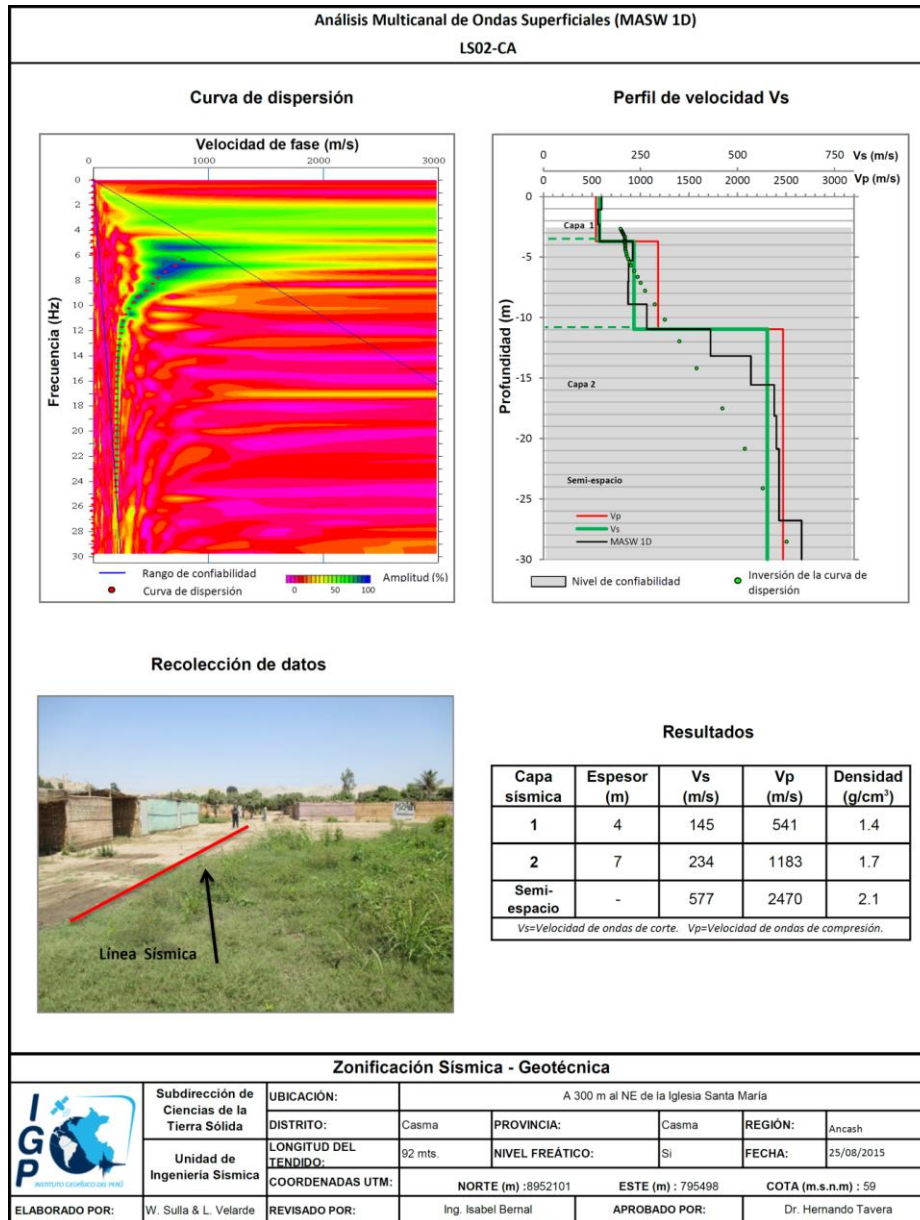


Figura 68.b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS02-CA.

**- Línea sísmica LS04-CA:** Línea sísmica realizada en la calle Los Cipreces, ubicada en la Urb. California. El perfil de velocidad  $V_s$  muestra resultados confiables hasta una profundidad de 22 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas de 4 y 9 metros de espesor, y con

velocidades de 215 m/s y 307 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estos valores sugieren suelos moderadamente duros para ambas capas. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidad de 581 m/s, que sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 68d).

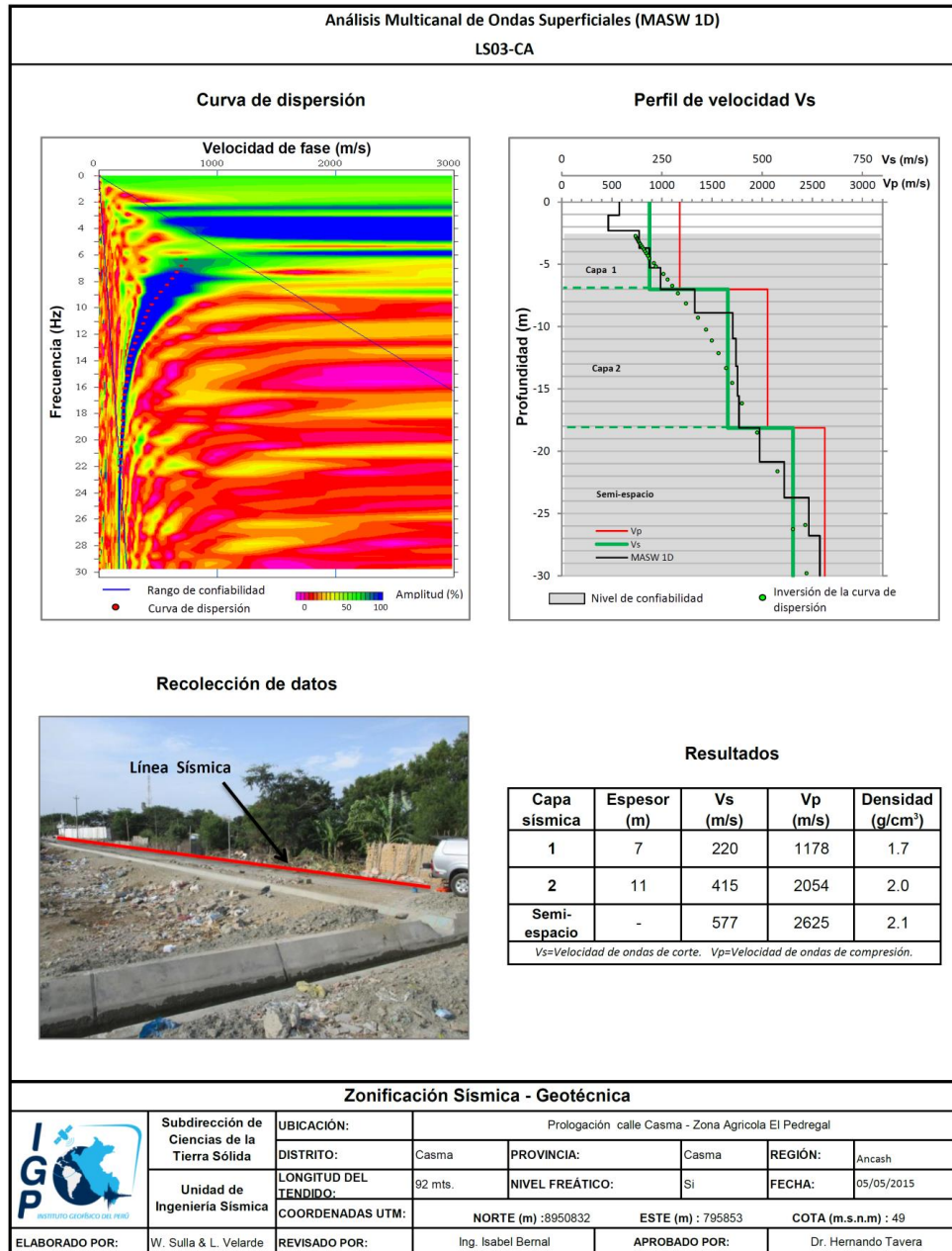


Figura 68.c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS03-CA.

**.- Línea sísmica LS05-CA:** Línea sísmica realizada en el Estadio Municipal Valeriano López Mendiola de Casma. El perfil de velocidad Vs indica resultados confiables hasta una profundidad de 23 metros, en donde se muestra la presencia

de suelos conformados por dos capas de 4 y 14 metros de espesor, y velocidades de 183 m/s y 195 m/s para la primera y segunda capa respectivamente. Estos valores sugieren suelos blandos para la primera capa y suelos moderadamente duros para la segunda. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades de 444 m/s lo cual sugiere suelos duros (Figura 68e).

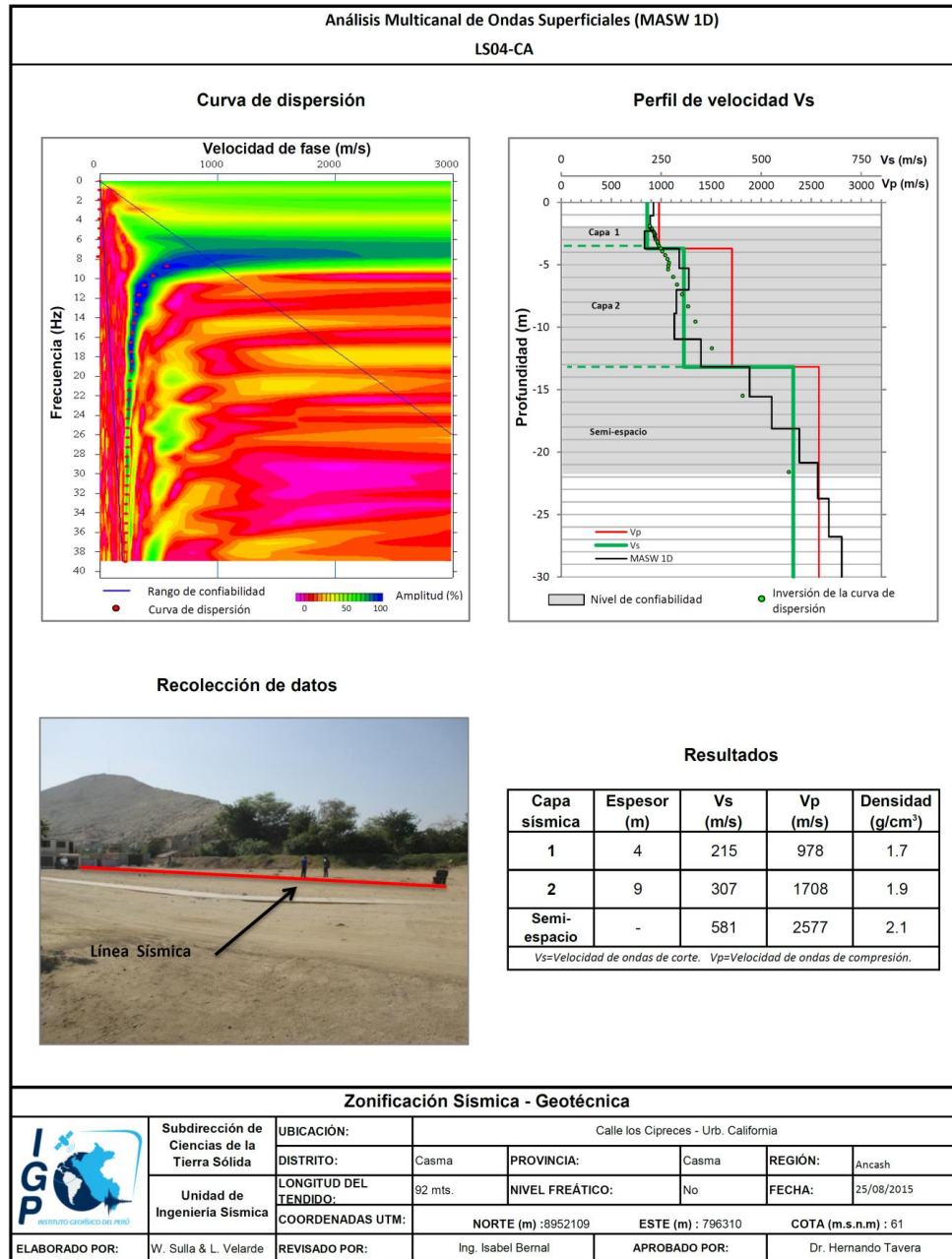


Figura 68.d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS04-CA.

**- Línea sísmica LS06-CA:** Línea sísmica realizada frente al Instituto Superior Tecnológico Público de Casma. El perfil de velocidad  $V_s$  indica resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, en donde se muestra la presencia de suelos conformados por dos capas de 5 y 16 metros de espesor y con velocidades de 240 m/s y 372 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estos valores sugieren suelos moderadamente duros para la capa más superficial, y suelos duros para la segunda capa. La superficie de contacto con el semiespacio presenta velocidades de 517 m/s lo cual sugiere suelos muy duros o roca blanda (Figura 68f).

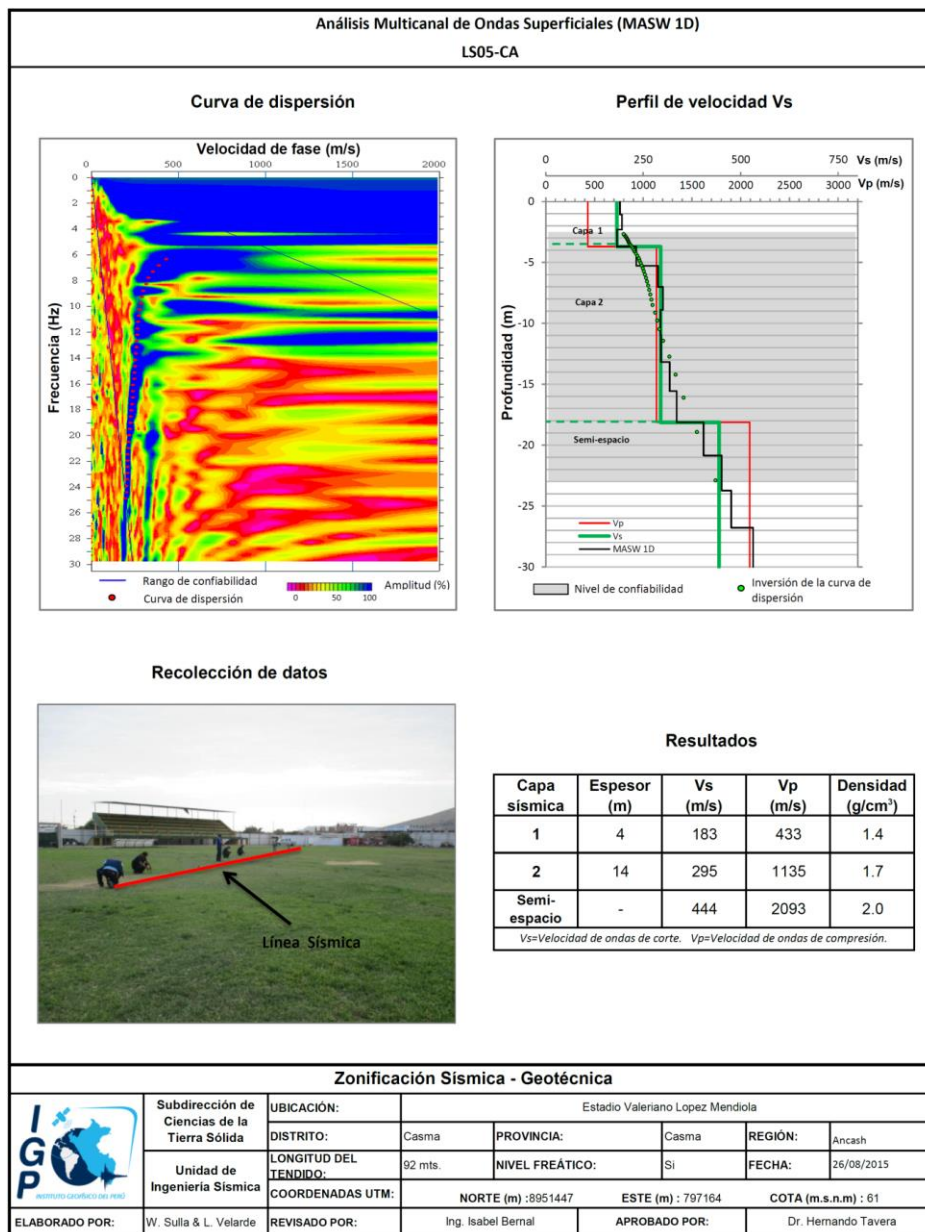


Figura 68.e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS05-CA.

**- Línea sísmica LS07-CA:** Línea sísmica realizada en la calle Sucre, ubicada en el AAHH Dos de Mayo. El perfil de velocidad Vs indica resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas de 4 y 9 metros de espesor y con velocidades de 193 m/s y 339 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estos valores sugieren suelos moderadamente duros para ambas capas. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 524 m/s que sugiere suelos muy duros o posible roca blanda (Figura 68g).

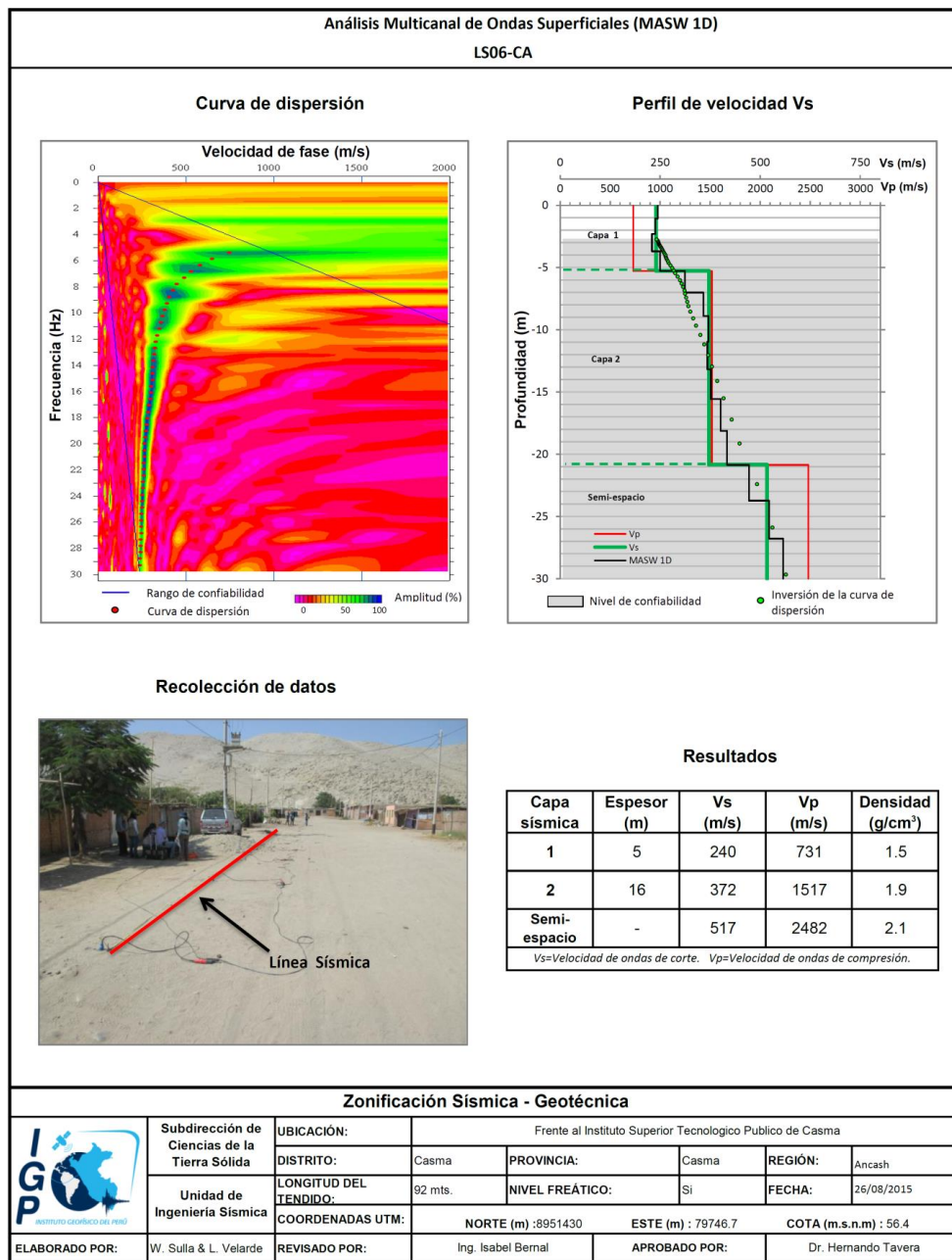


Figura 68.f: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS06-CA.

**- Línea sísmica LS08-CA:** Línea sísmica realizada en el AAHH Nuevo Casma. El perfil de velocidad Vs indica resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, de 4 y 7 metros de espesor, y con velocidades de 263 m/s y 370 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estas velocidades sugieren suelos moderadamente duros para la capa superficial y suelos duros para la segunda capa. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 554 m/s al cual correspondería a suelos muy duros o roca blanda (Figura 68h).

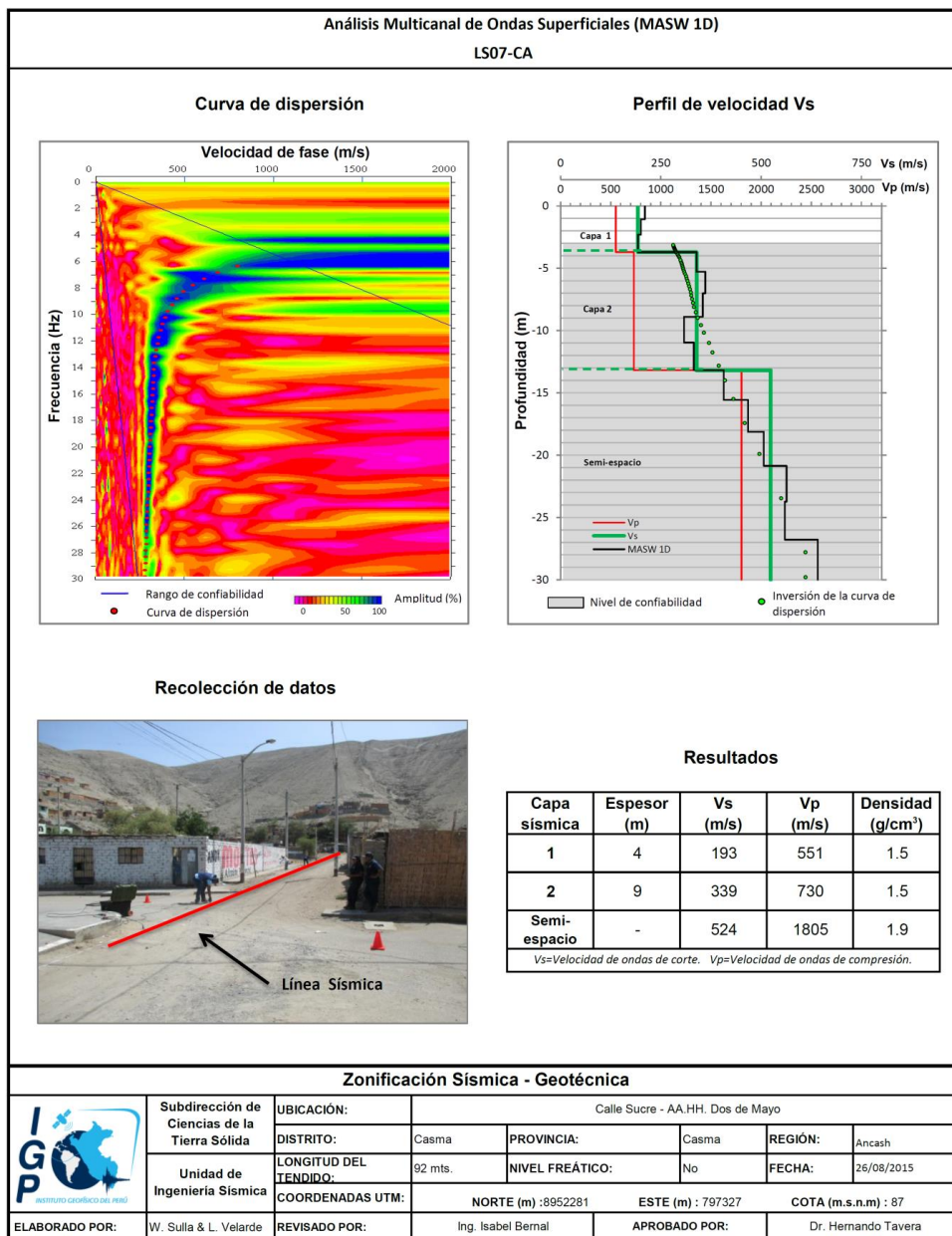


Figura 68.g: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS07-CA.

**- Línea sísmica LS09-CA:** Línea sísmica realizada en el AAHH Villa Hermosa. El perfil de velocidad Vs indica resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, de 7 y 14 metros de espesor, y con velocidades de 299 m/s y 455 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estas velocidades sugieren una capa superficial de suelos moderadamente duros asentada sobre suelos duros. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 573 m/s la cual correspondería a suelos muy duro o roca blanda (Figura 68i).

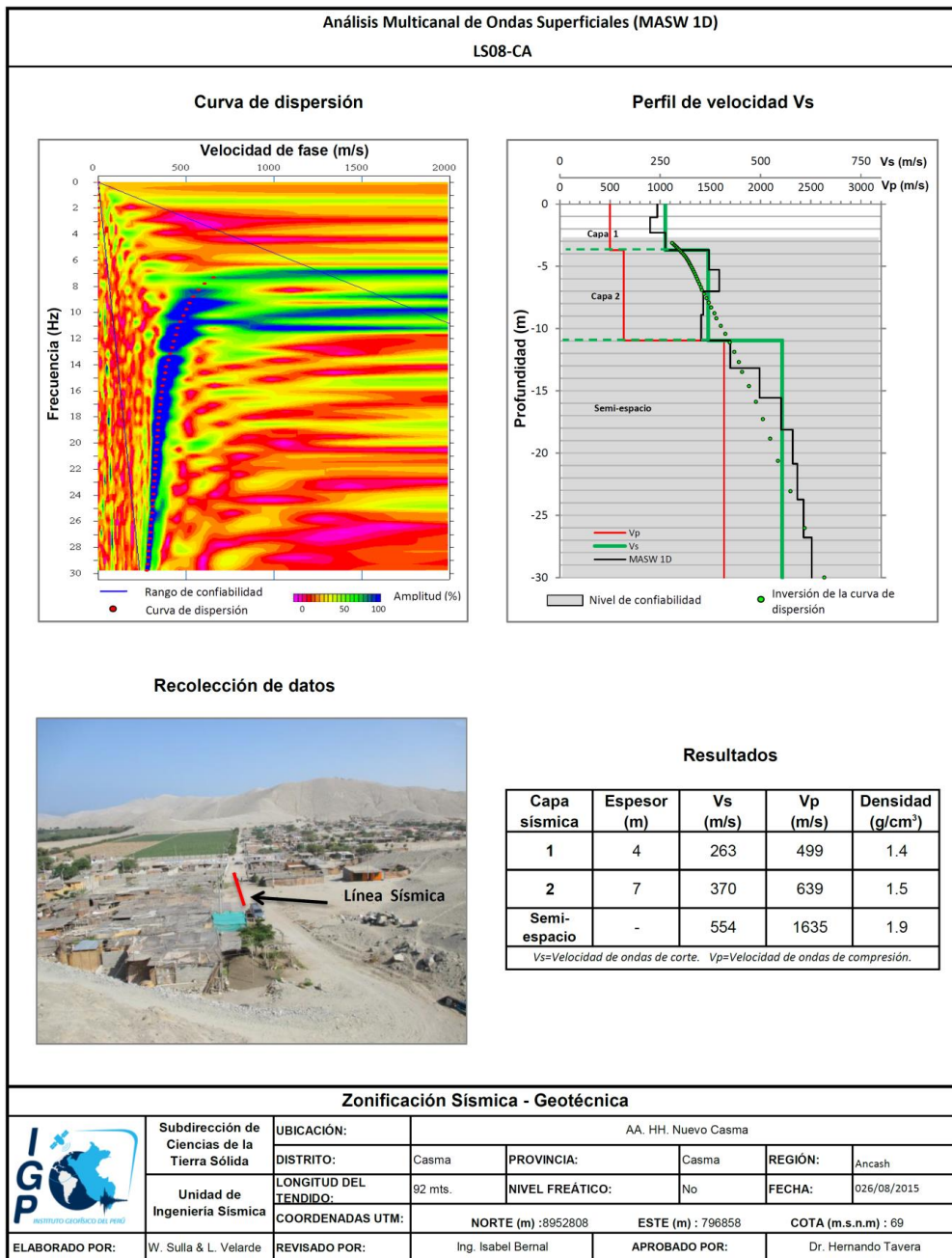


Figura 68 h: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS08-CA.

**- Línea sísmica LS10-CA:** Línea sísmica realizada en el AAHH Villa Hermosa. El perfil de velocidad Vs indica resultados confiables hasta una profundidad de 30 metros, identificándose la presencia de suelos conformados por dos capas, de 4 y 7 metros de espesor, y con velocidades de 190 m/s y 556 m/s, para la primera y segunda capa respectivamente. Estas velocidades sugieren una capa superficial de suelos moderadamente duros, asentada sobre suelos duros o roca blanda. La superficie de contacto con el semiespacio, presenta velocidades mayores a 1114 m/s lo cual sugiere rocas moderadamente duras (Figura 68j).

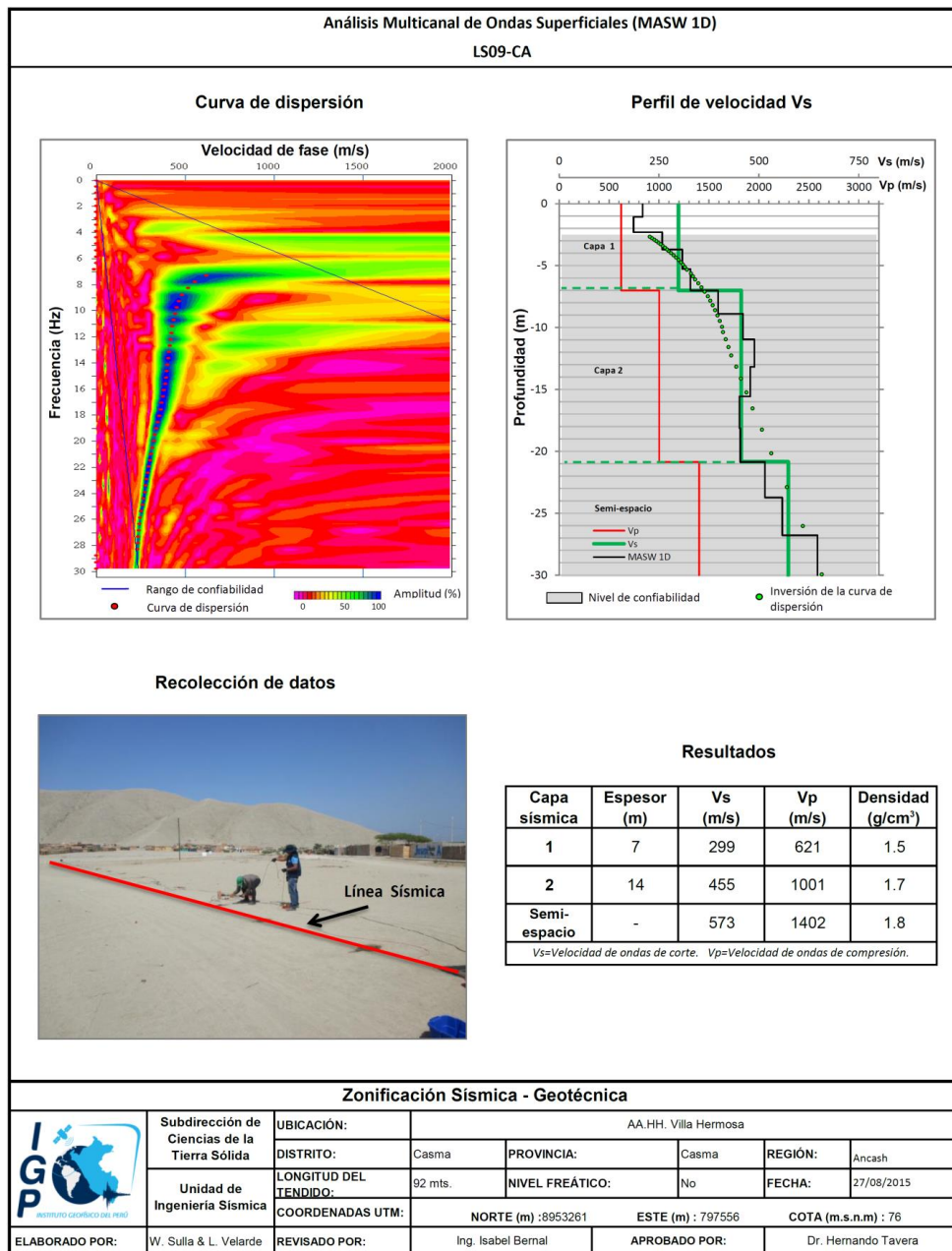


Figura 68.i: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS09-CA.

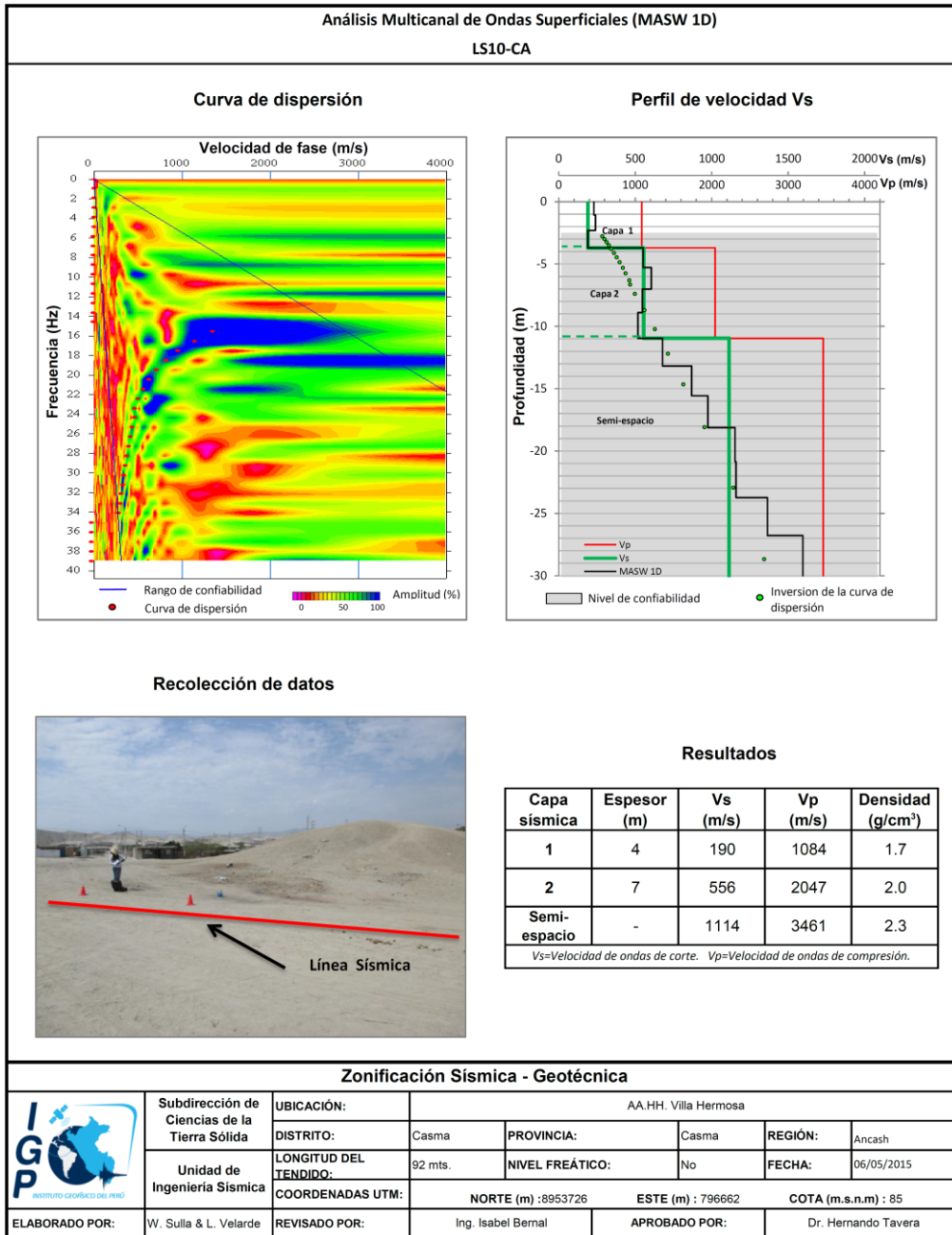







Figura 68.j: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para la línea LS10-CA.

La Tabla 10, muestra en detalle los espesores y las velocidades de las ondas Vs en las capas de suelos identificados para cada línea sísmica. De acuerdo a la descripción geología realizada en campo, la zona de estudio está conformada por depósitos aluviales emplazados en toda la parte urbana de la ciudad de Casma, por depósitos fluviales ubicados a lo largo del cauce y márgenes del río Sechín y por el material intrusivo que son caracterizados en cerros que rodean la ciudad.

Tabla 11. Resumen de los valores de espesor y velocidad de ondas Vs para cada línea sísmica

Línea sísmica	n° capa		
	1	2	Semiespacio
	Vs (m/s), (Esp. (m))	Vs (m/s), (Esp. (m))	Vs (m/s)
LS01-CA	185 (7)	340 (11)	462
LS02-CA	145 (4)	234 (7)	577
LS03-CA	220 (7)	415 (11)	577
LS04-CA	215 (4)	307 (9)	581
LS05-CA	183 (4)	295 (14)	444
LS06-CA	240 (5)	372 (16)	517
LS07-CA	193 (4)	339 (9)	517
LS08-CA	263 (4)	370 (7)	554
LS09-CA	299 (7)	455 (14)	573
LS10-CA	190 (4)	556 (7)	1114
Suelos blandos ( $V_s < 180$ m/s)			
Suelos duros ( $V_s=180$ m/s - 500m/s)			
.....moderadamente duros (180 - 350)			
.....duros (350 -500)			
Suelos muy duros o roca blanda ( $V_s=500$ m/s-800m/s)			
Rocas moderadamente duras ( $V_s=800$ m/s-1500m/s)			

En resumen, los perfiles de velocidad ( $V_s$ ) obtenidos con el método MASW para la ciudad de Casma, evidencian que la primera capa de las líneas LS01 y LS02 muestran bajos valores de velocidad ( $V_s < 190$  m/s), y corresponderían a medios conformados por suelos agrícolas. Asimismo, la baja velocidad encontrada para la primera capa en la línea LS05 ( $V_s=183$  m/s), posiblemente es debido a que dicha línea fue realizada en el campo del estadio municipal. La segunda capa, con velocidades entre 230 m/s a 460 m/s fue identificada en todas las líneas y corresponden a suelos moderadamente duros y suelos duros. Geológicamente, corresponderían al material aluvial, eluvial y fluvial que sirve de base parte el área urbana de la ciudad de Casma, tal como se observa en la Figura 67.

Las velocidades del semiespacio, en su mayoría mayores a 500 m/s, corresponderían al intrusivo altamente fracturado y meteorizado que sirve de estrato de base. En el caso de la línea LS10-CA, la superficie de contacto entre el suelo y el intrusivo se encuentra a la profundidad de 4 metros. En todos los perfiles, los valores de densidad y de velocidad de la onda P son aproximaciones.

### 11.3.- Periodos dominantes

Los resultados finales obtenidos con la técnica H/V; es decir, los valores de frecuencias predominantes 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 69 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Casma. Los resultados indican que en área de estudio sobresalen dos rangos de periodos, mayores y menores a 0.3 segundos. En los alrededores de la Plaza de Armas, los periodos dominantes son menores o iguales a 0.3 segundos, al este de la ciudad se tiene periodos predominantes de 0.4 y 0.5 segundos, en el A.H. Villa Hermosa los periodos dominantes son de 0.3 y 0.4 segundos, disminuyendo estos valores en la periferia. Los periodos con valores de 0.1 y 0.2 están presentes al pie de las laderas de los cerros.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Huaral 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 150 m/s y 200 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 11 y 15 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 la presencia de dos zonas con suelos dinámicamente similares. La primera zona está definida por los periodos menores e iguales a 0.3 segundos, los mismos que se encuentran en la mayor parte de la ciudad, así como en el AAHH Villa Hermosa. 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. La segunda zona es definida por la presencia de periodos dominantes mayores a 0.3 segundos, distribuidos al este de

Casma. Estos valores sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran potencia que domina el comportamiento dinámico de la zona.

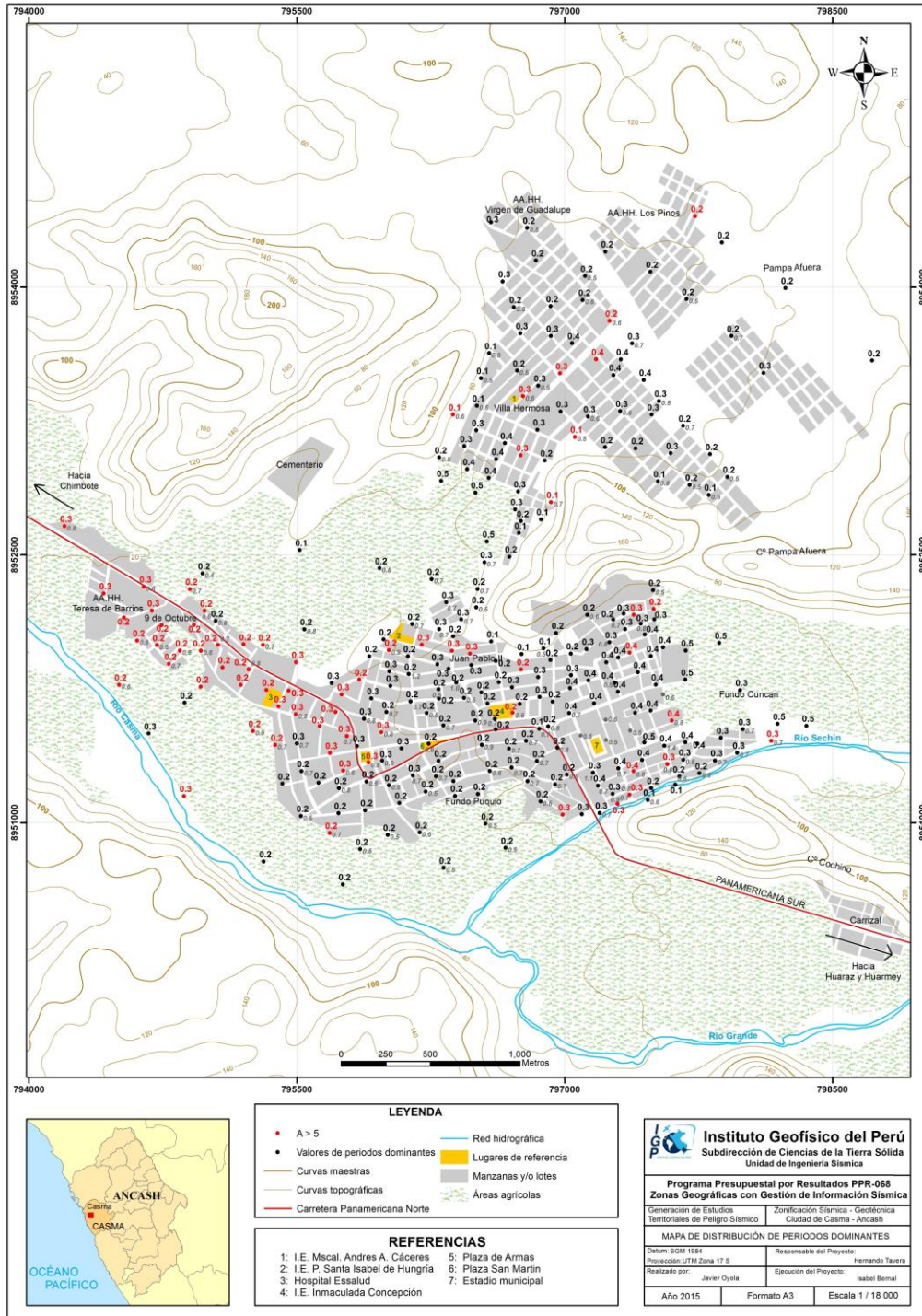


Figura 69: Mapa de la ciudad de Casma y distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

#### 11.4.- Estudios de tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Casma se han realizado 6 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo (Figura 70) y la distribución de 15 y 10 electrodos con un espaciamiento de 6 a 10 metros y sobre tendidos longitudinales de 144 y 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 24 y 40 metros (Tabla 12).

Tabla 12: Parámetros de operación considerados en los tendidos eléctricos

Línea eléctrica	Separación de Dipolo / Número de Electrodo	Extensión de la línea	Orientación de la línea
LE01-CA	10 m / 25 electrodos	240 m	NE - SW
LE02-CA	10 m / 25 electrodos	240 m	N - S
LE03-CA	6 m / 25 electrodos	144 m	NE - SW
LE04-CA	10 m / 25 electrodos	240 m	N - S
LE05-CA	6 m / 25 electrodos	144 m	N - S
LE06-CA	6 m / 25 electrodos	144 m	NE - SW

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 Casma (Figura 71).

*.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-CA: La línea realizada en la Av. San José (a lado del asilo) con el predominio de valores bajo resistivos a lo largo de la línea. Valores de resistividad menores a 100 ohm.m se extienden por toda la línea con espesores que llegan a los 30 metros en algunos lugares, y pueden asociarse a la presencia de un canal de regadío y terrenos de cultivo próximos a la línea. Por debajo de estos valores se observan otros mayores a 100 ohm.m que se extienden entre las estaciones 40 a 220, con espesor irregular. Valores menores a 20 ohm.m se observan al SO de la línea, tanto en la parte superficial como en profundidad. Estos valores se presentan en forma de un ovoide entre las estaciones 60 a 90 aproximadamente y a 10 metros de profundidad. En*

profundidad, entre las estaciones 150 a 170 se observan valores de resistividad mayores a 500 ohm.m (Figura 71a). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena y gravas. Superficie compacta.

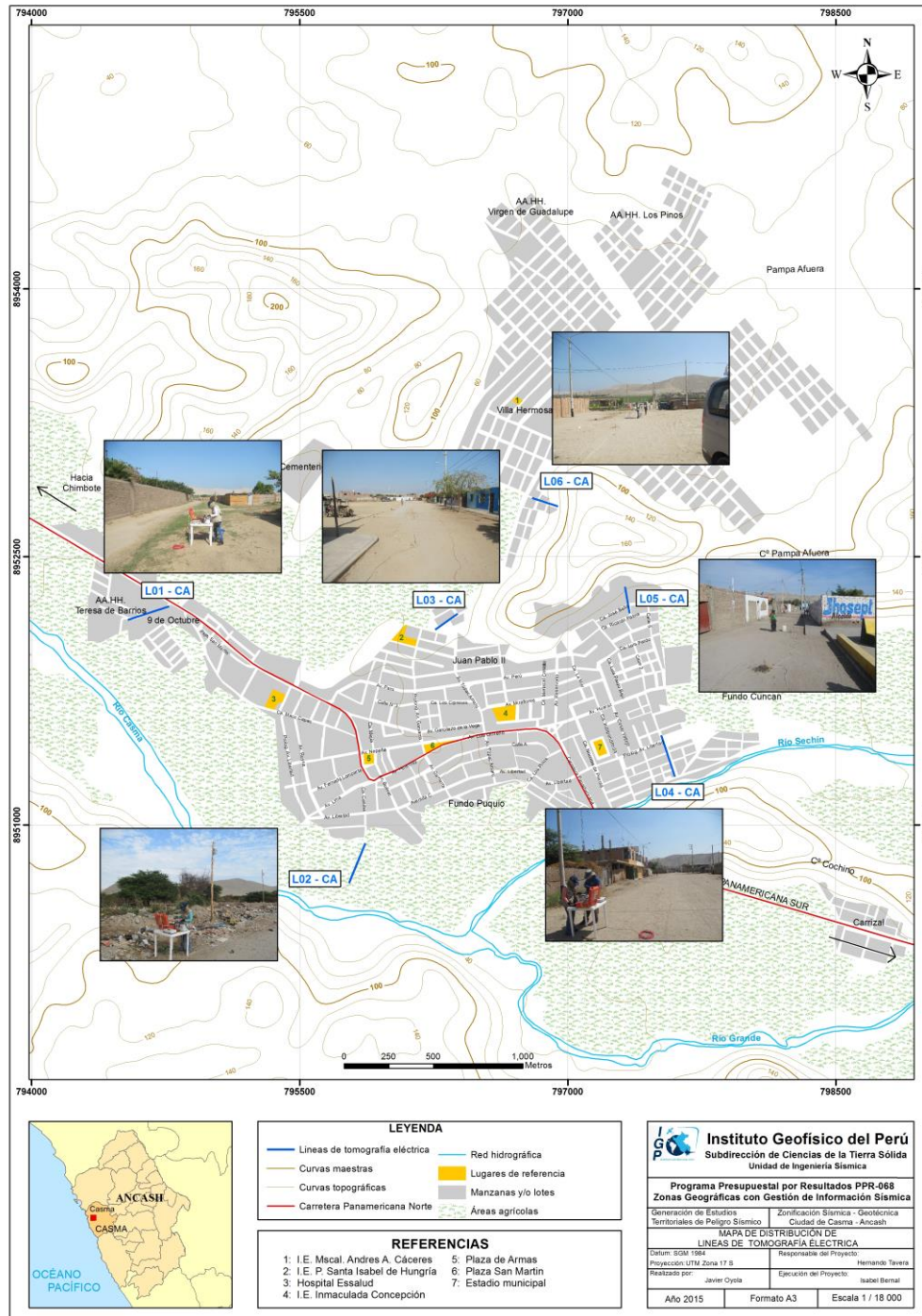


Figura 70: Mapa de la ciudad de Casma y ubicación de las 6 líneas de tomografía eléctrica.

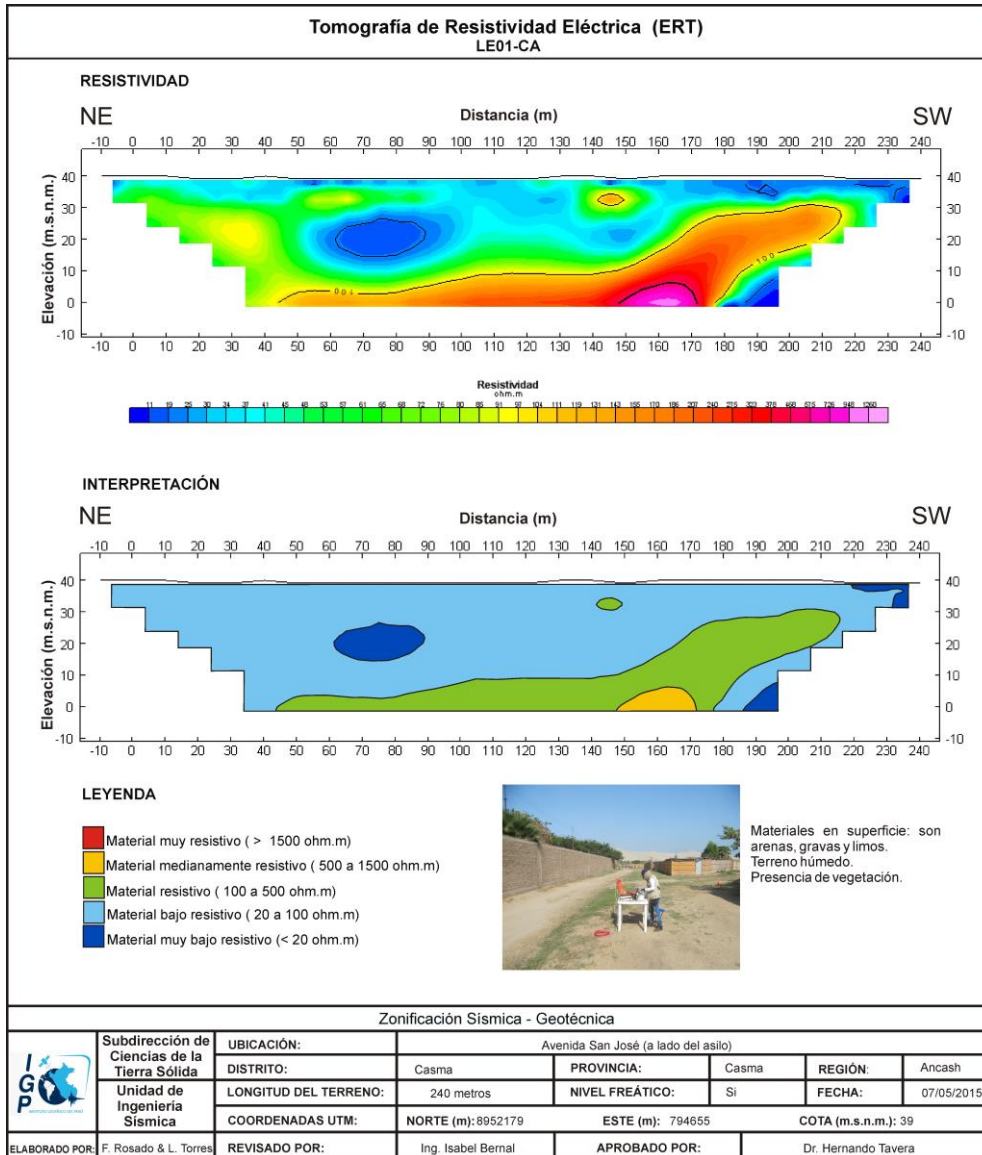


Figura 71.a: Análisis e interpretación de la Línea 01 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

**- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-CA:** Línea sísmica realizada a 70 metros al río Casma aproximadamente. El espaciamiento entre electrodos es de 10 m, el número de niveles máximos leídos es 10 por punto de lectura, la profundidad alcanzada es de 40m. Los valores bajo resistivos predominan en la línea. Valores de resistividad mayores a 500 ohm.m al inicio de la línea hasta la estación 10, seguido de estos valores de resistividad, se observan otros mayores a 100 ohm.m que afloran en superficie. Estos valores se observan también desde la estación 60 hasta el final de la línea con espesores diferentes. Los valores de resistividad mayores a 20 ohm.m se observan en la parte superficial de la línea y se extienden a profundidad. En el extremo Sur y a mayor profundidad, se

observan valores de resistividad menores a 20 ohm.m, estos valores también se observan entre las estaciones 100 a 125 y formando un ovoide en la estación 20. Los valores bajos de resistividad en esta zona pueden asociarse a que el nivel freático en la zona es alto y a la influencia del río Casma (Figura 71b). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena fina, gravas y rocas. Superficie compacta y con presencia de humedad.

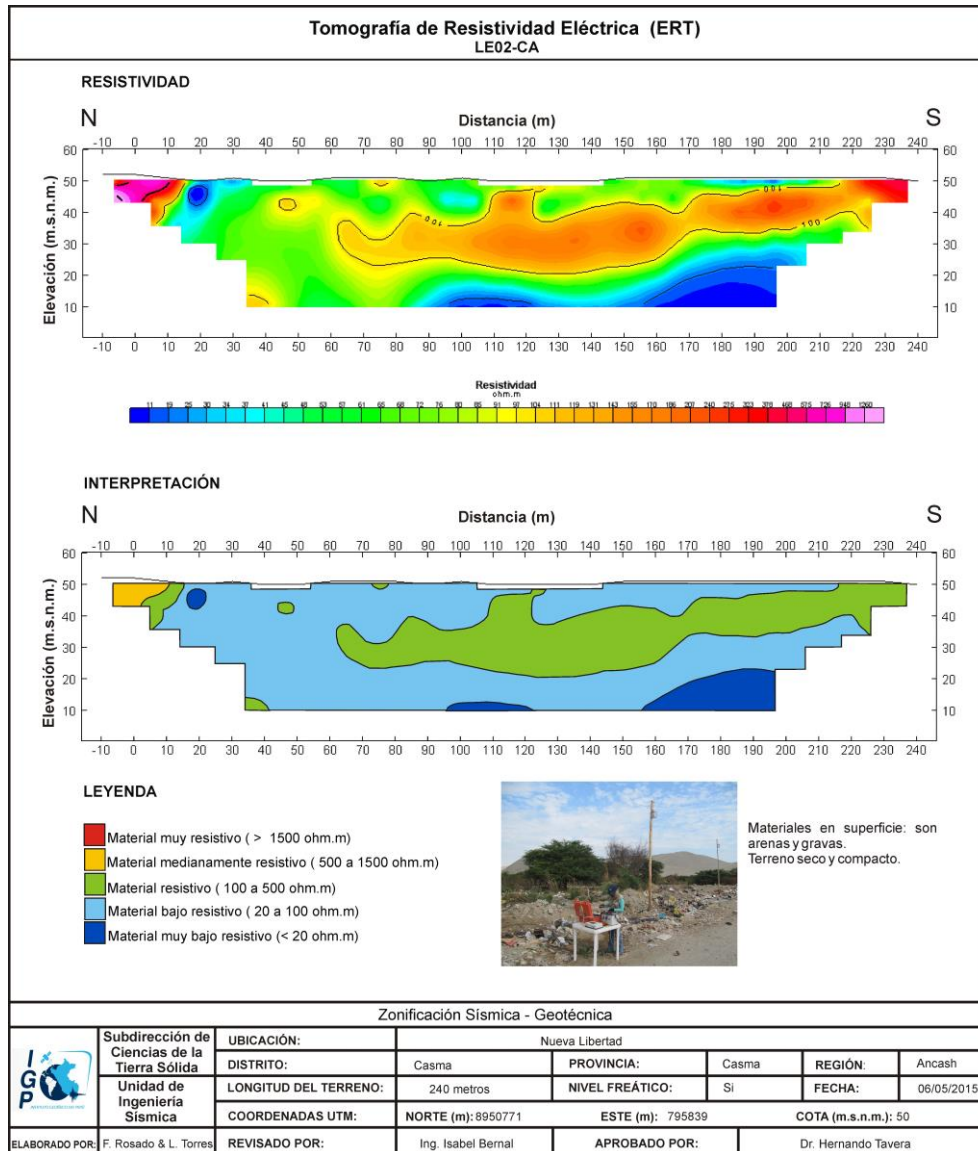


Figura 71b: Análisis e interpretación de la Línea 02 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

**- Línea de tomografía eléctrica LE03-CA:** Línea sísmica realizada en la Urb. California, entrada a Villa Hermosa. El espaciamiento entre electrodos es de 6 m, el número de niveles máximos leídos es 10 por punto de lectura, la profundidad alcanzada es de 24 m. Los valores bajo resistivos son los que predominan en la

línea. En superficie se observan valores de resistividad menores a 20 ohm.m, entre las estaciones 72 a 78 y en profundidad, estos valores se encuentran entre la estación 96 hasta 118. Los valores mayores a 20 ohm.m ocupan la mayor parte de la superficie extendiéndose a profundidad. Estos valores tienen mayor espesor en el extremo NE de la línea. Desde la estación 36 hasta el extremo SO, se observa valores de resistividad mayores a 100 ohm.m con espesor variable (Figura 71c). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena fina, gravas y rocas. Superficie compacta y con presencia de humedad en algunos tramos de la línea.

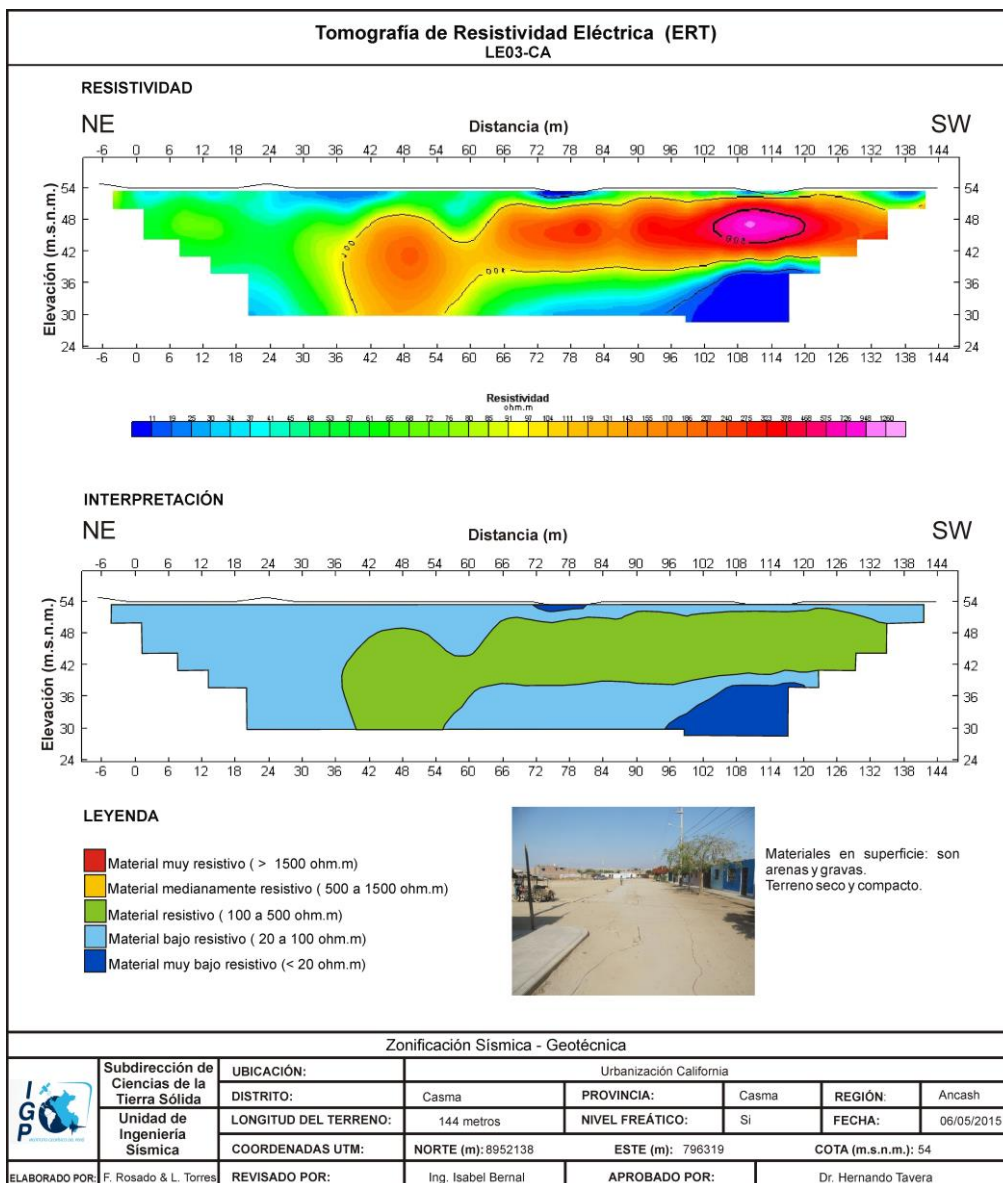


Figura 71c.: Análisis e interpretación de la Línea 03 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

**.- Línea de tomografía eléctrica LE04-CA:** Línea sísmica realizada frente al Instituto Superior Tecnológico Público de Casma. El espaciamiento entre electrodos es de 10 m, el número de niveles máximos leídos es 10 por punto de lectura, la profundidad alcanzada es de 40 m. Los valores resistivos y medianamente resistivos son los que predominan en la línea. Se observa valores de resistividad mayores a 500 ohm.m en la parte superficial de la línea con espesores variables, estos valores altos pueden asociarse a la presencia de materiales más resistivos. Por debajo de estos valores se observa otros de resistividad menor a 500 ohm.m que se extienden a lo largo de la línea con espesores variables. Estos valores también se observan a profundidad. Valores menores a 100 ohm.m se observan a lo largo de la línea, con espesores diferentes y que pueden asociarse a la influencia del río Sechín (Figura 71d). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena y gravas. Superficie muy seca.

**.- Línea de tomografía eléctrica LE05-CA:** Línea sísmica realizada en San Isidro Alto. El espaciamiento entre electrodos es de 6 m, el número de niveles máximos leídos es 10 por punto de lectura, la profundidad alcanzada es de 24 m. Los valores bajo resistivos y resistivos son los que predominan en la línea. En superficie entre las estaciones 72 a 78 se observa valores mayores a 1500 ohm.m. Valores mayores a 500 ohm.m se observan desde la estación 33 hasta la estación 102 en superficie. Valores de 11 a 100 ohm.m se observan a lo largo de la línea en profundidad con espesores variables (Figura 71e). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena y gravas. Superficie muy seca.

**.- Línea de tomografía eléctrica LE06-CH:** Línea sísmica realizada en San Isidro Alto. El espaciamiento entre electrodos es de 6 m, el número de niveles máximos leídos es 10 por punto de lectura, la profundidad alcanzada es de 24 m. Los valores resistivos son los que predominan en la línea. Se observa valores menores a 100 ohm.m entre las estaciones 42 a 78, los valores bajos en este tramo pueden asociarse a la presencia de una toma de agua próxima. Por debajo de estos valores se observan valores entre 101 a 500 ohm.m en a lo largo de la línea con espesores variables y proyectándose en profundidad. En la parte media se observan valores mayores a 500 ohm.m, los valores más altos de resistividad pueden asociarse a que la línea está en ladera de un cerro (Figura

71f). Los materiales que conforman la parte superficial de la línea son arena. Superficie muy seca

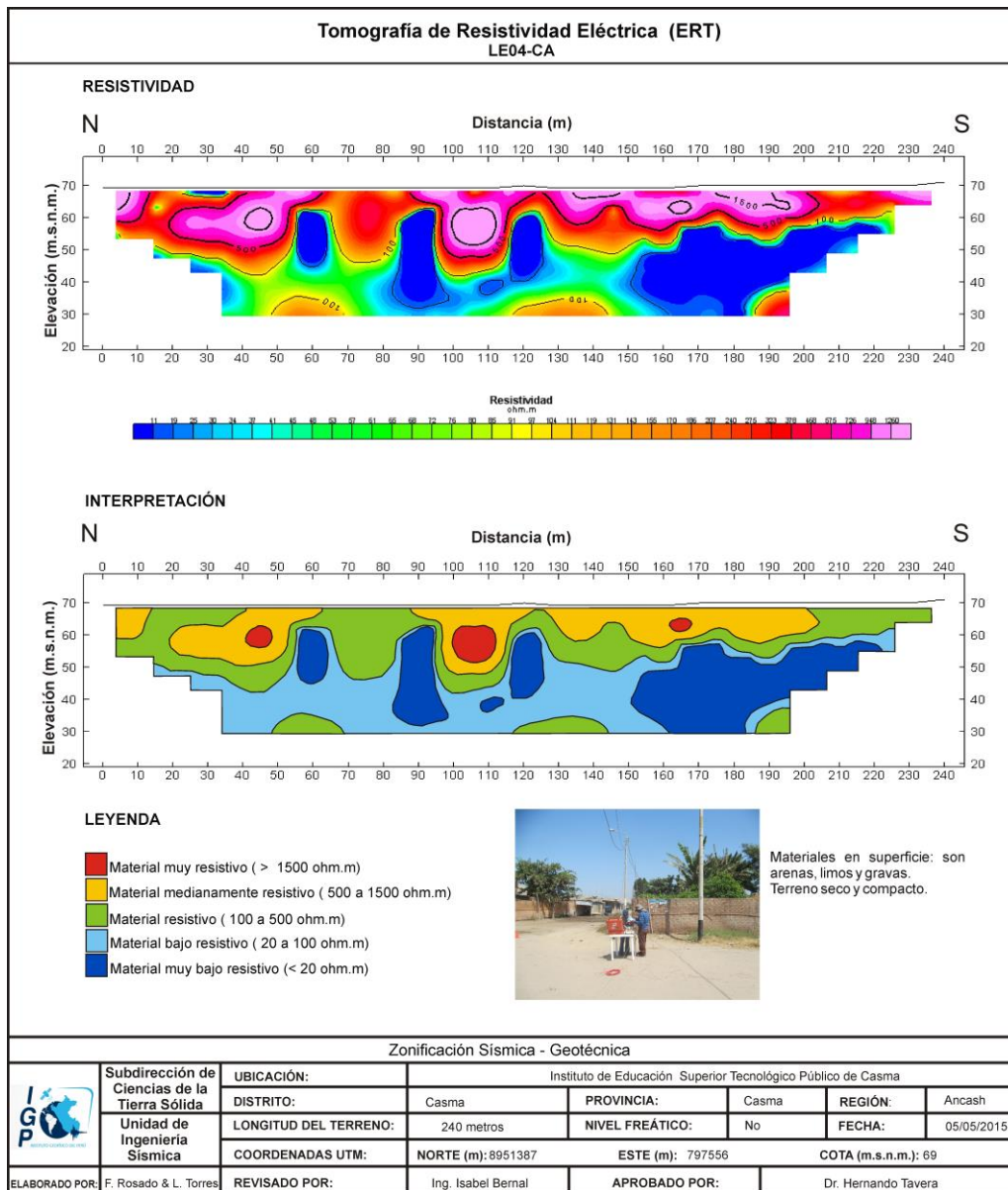


Figura 71d.: Análisis e interpretación de la Línea 04 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

En resumen, la distribución de los valores de resistividad, evidencian la presencia de valores bajos resistivos a resistivos, en el extremo Oeste del área urbana de Casma, asociados a la influencia de los ríos Casma, Sechin y a que el nivel freático en la zona es alto. Hacia su extremo Este se observa el predominio de valores resistivos y medianamente resistivos, asociados a la influencia de materiales más resistivos por la proximidad de los cerros con estas líneas.

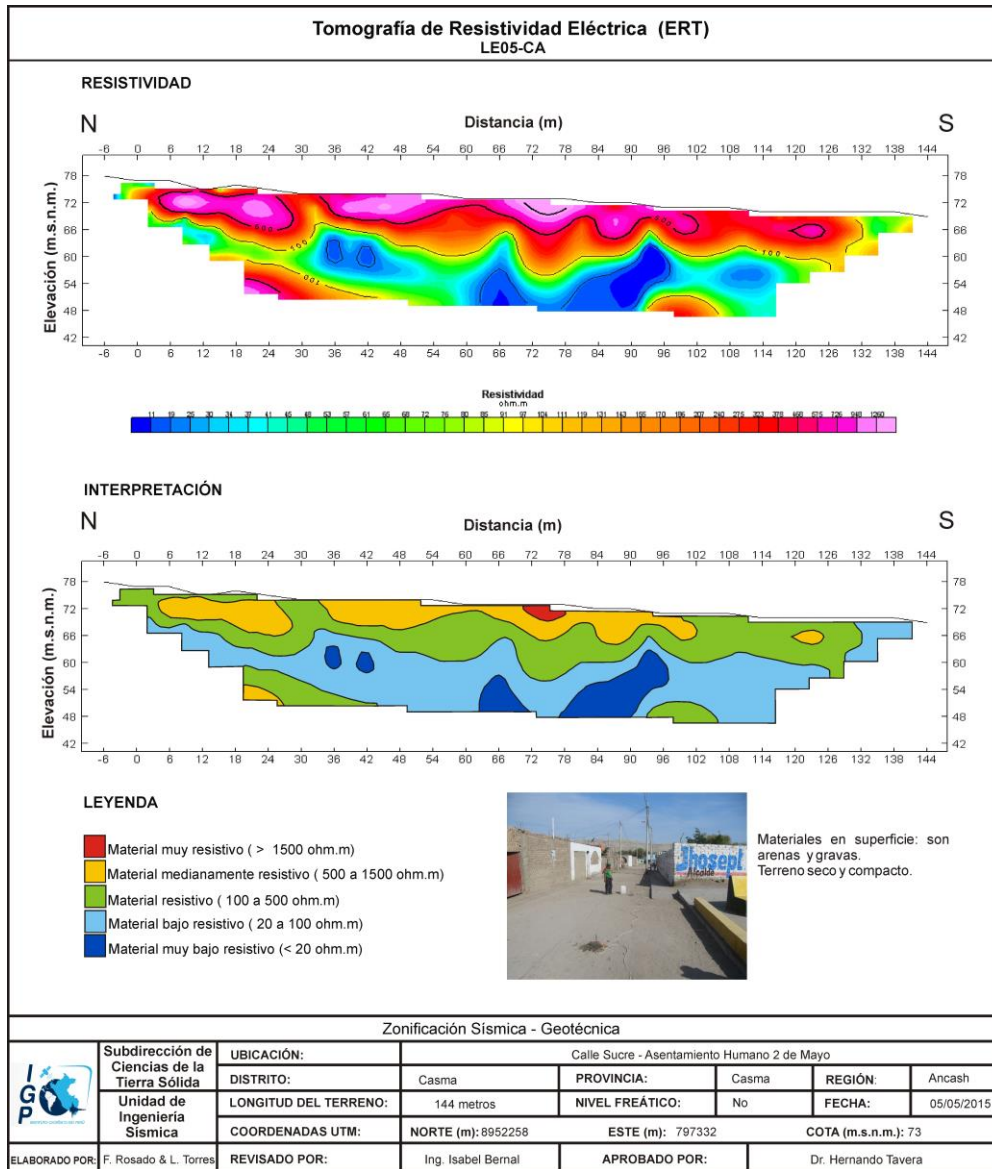


Figura 71e.: Análisis e interpretación de la Línea 05 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

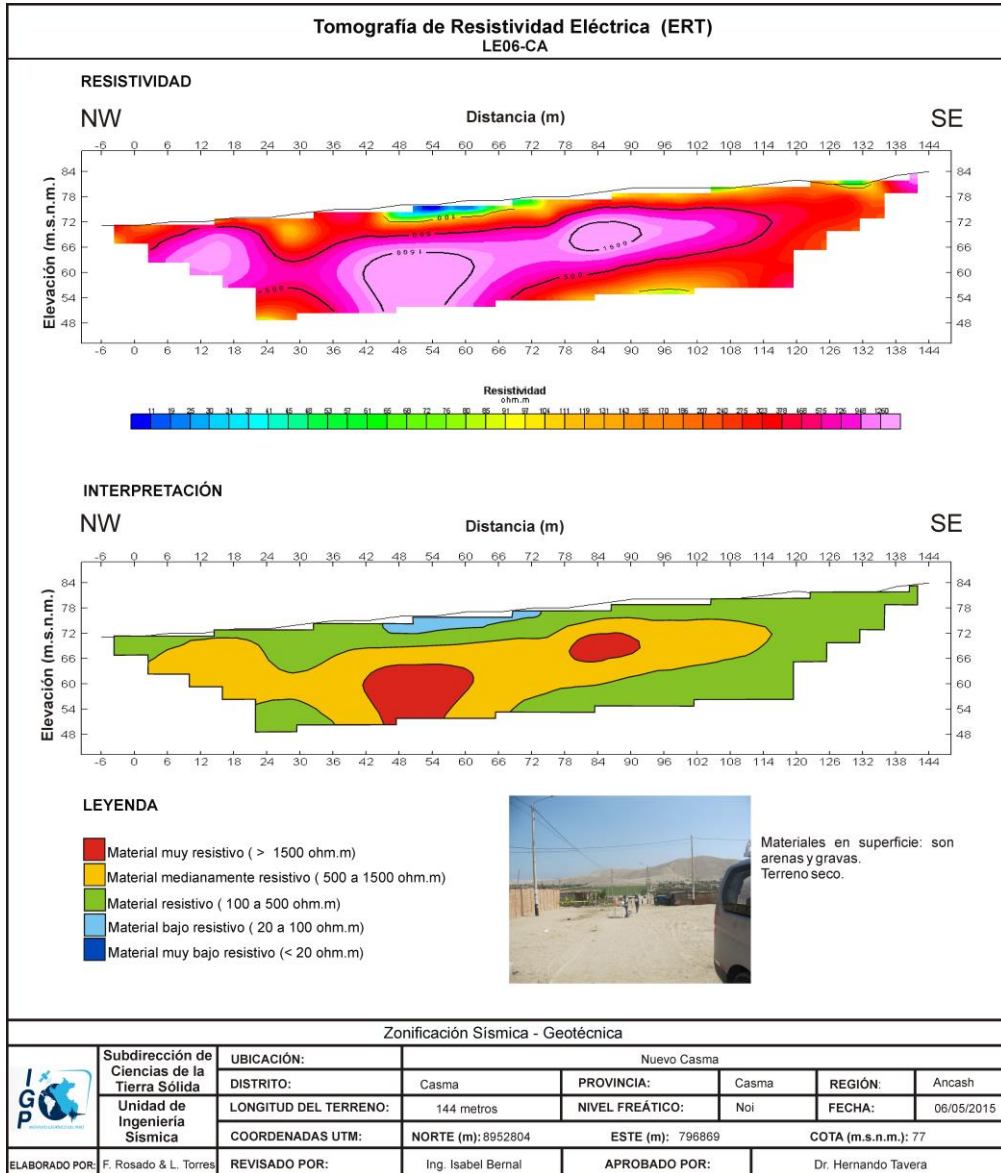


Figura 71f.: Análisis e interpretación de la Línea 06 de tomografía eléctrica en la localidad de Casma.

## 12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Casma considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Casma, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

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

Para la ciudad de Casma se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 72):

*.- **ZONA I:** 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 un comportamiento 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. La zona presenta suelos con capacidad portante de media a alta.*

*.- **ZONA II:** Se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3 y 16 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene grava. Los periodos predominantes del terreno son mayores a 0.4 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona presenta velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) de 350 a 400 m/s. La zona presenta suelos con capacidad portante de baja a media.*

*.- **ZONA IV:** Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. El comportamiento dinámico de los suelos ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E03, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).*

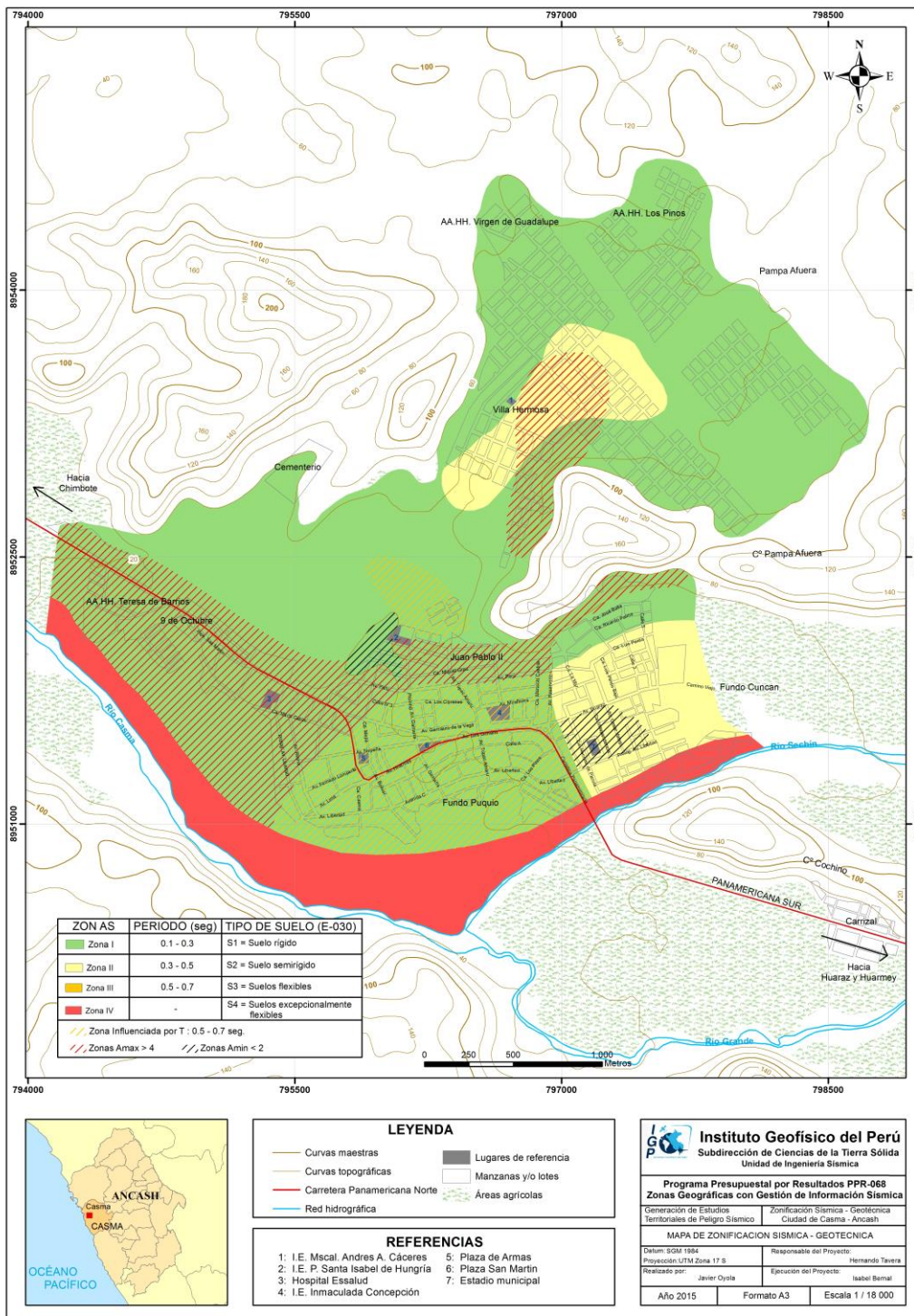


Figura 72: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Casma

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

### CONCLUSIONES

El 70 % de la superficie de la zona urbana de Casma se ubica sobre una terraza aluvial, el 20% sobre el abanico aluvial y el 10 % en la llanura de inundación. Asimismo, en los alrededores se han identificado otras unidades como: lomas y lecho fluvial.

Los materiales que conforman el subsuelo en la ciudad de Casma corresponden a depósitos aluviales (arenas de grano fino a medio, con presencia de limos y clastos de origen ígneo redondeados a subredondeados de diámetros menores a 10 cm, en una matriz arenosa o areno limosa), mientras que, como substrato rocoso se tienen rocas intrusivas de la Superunidad Santa Roca, conformado principalmente por tonalitas, que afloran en los cerros: La Virgen, Pampa Afuera, Corrales, Fundo La Máquina y Veta Negra.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Casma ha permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E-030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S1, S2 y S4.

### RECOMENDACIONES

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

## 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 microtemores. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo 35, 415–457.
- Bard, P-Y. (1995) Effects of surface geology on ground motion: Recent results and remaining issues, In Proc. 10 European Conf. Earth. Eng., ed. Duma, Balkema, Rotterdam, 305-323
- Bard, P-Y y SESAME (2001) The SESAME project: an overview and main results. 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 2207
- Beresnev, I.A., K.L. Wen, and Y.T. Yeh 1995a, “Nonlinear Soil Amplification: It’s Corroboration in Taiwan. Bull, Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 496-515
- Bernal, I. (2002) Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala, Mexico. Tesis de Maestría en Ciencias, UNAM, pag. 130.
- Bernal, I. (2006): Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Tlaxcala – Mexico. Tesis de Maestría, II-UNAM, Mexico.
- Bernal, I. y H. Tavera (2007): Estimación de frecuencias predominantes y amplificaciones relativas en los terrenos del BCP-Ciudad de Trujillo. Informe presentado al BCP, 22p.
- Braja, M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson y Learning, 580 pag.
- Capon, J.,(1973): Signal processing and frequency-wavenumber spectrum analysis for a large aperture seismic array, in *Methods in Computational Physics*, Vol. 13, ed. Bolt, B.A., Academic Press Inc, New York
- Carpio, J. y Tavera, H. (2002). Estructura de un catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catálogo 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
- Dávila. S y Celi, C, INGEMMET (1994) - Estudio Geodinámico de la cuenca del río Chancay – Huaral", Boletín N° 012.
- 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.
- INRENA (1994) - Diagnóstico de la calidad del agua de la vertiente del Pacífico: Cuenca Chancay – Huaral.
- INRENA (2001) - Evaluación y ordenamiento de los recursos hídricos de la cuenca Chancay – Huaral.
- INDECI-PENUD (2007) - Mapa de Peligros de la Ciudad de Chancay.
- Goto, C. y Ogawa, Y. (1992): Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-frog Scheme. Translated for the TIME project by N Shuto.
- Guillier, B., J.-L. Chatelain . H. Tavera . H. Perfettini . A. Ochoa . B. Herrera (2014): Establishing empirical period formula for RC buildings in Lima (Peru): evidence for the impact of both the 1974 Lima earthquake and the application of the Peruvian seismic code on high-rise buildings (in preparation).
- Gutiérrez-Elorza, M. (2008). Geomorfología. Pearson Education, S.A., Madrid, 898 pp.
- Gutierrez, C. y S.K. Singh (1992): A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong motion and microtremor data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82, 642-659, 1992.
- 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.
- 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>
- Municipalidad Provincial de Casma (2010). Plan de Desarrollo Concertado Provincial de Casma.
- Morisawa, M. (1968). *Streams: their dynamics and morphology*. McGraw-Hill. New York, New York, USA.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1,25-33 pp.
- Norma E-30 (2016): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- Palacios, O., y Caldas, J., y Vela, C., INGEMMET (1992) - Geología del Cuadrángulo de Chancay – Hoja 24i.
- Papazachos, et al. (2004): Global realtions between seismic fault parameters and momento magnitude of eathquakes. *Bull. Geol. Soc. of Greece*, 36, 1482-1489.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña

- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- Tavera et al, (2002): The Arequipa (Peru) earthquake of June 23, 2001. *Journal of Seismology*, 6: 279-283, 2002.
- Tavera, H. (2014). Mapa Sísmico del Perú, periodo 1960 – 2014. Dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Tavera et al, (2014). Estimación del Peligro Sísmico para el Perú. Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, IGP.
- Varnes D.J. (1958). “Landslides types and processes”. Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.
- Varnes D.J. (1978). “Slope movement types and processes”. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.
- Villegas\_Lanza, J.C. (2014)
- 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



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

Calle Calatrava 216 – Urb. Camino Real – La Molina

Teléfono: 3172300 (140)