



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP

Dirección
Científica

Subdirección de
Ciencias de la Tierra
Sólida - SCTS



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

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



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA CIUDAD DE PUNTA DE BOMBÓN

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú
2015



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE PUNTA DE BOMBON

Provincia de Islay – Departamento de Arequipa

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Dr. Hernando Tavera

Desarrollo del Proyecto

Unidad de Ingeniería

MSc. Isabel Bernal

Unidad de Geodinámica

MSc. Juan Carlos Gomez

Personal participante

Fabiola Rosado

Wilfredo Sulla

Javier Oyola

Martha Añazco

Gabriela Pérez

Jesús Huarachi

Henry Salas

Renzo Bustamante

Segundo Ortiz

Mariana Vivanco

Roberth Carrillo

Cristhian Chiroque

Abraham Gamonal

Julio Martínez

José Guzman

Apoyo Técnico

Estela Torres

Augusto Cárdenas

RESUMEN EJECUTIVO

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

Los resultados obtenidos para la ciudad de Punta de Bombón han permitido identificar la existencia de tres tipos de suelos codificados como Tipo S1, Tipo S2 y Tipo S3 y según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), corresponden a las ZONAS I, II y III.

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

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.- Aspectos climáticos

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Sismicidad

7.2.- Estudios de Peligro Sísmico

7.3.- Estudios de Tsunami

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

8.1.- Sismicidad

8.2.- Peligro Sísmico

8.3.- Tsunamis

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Unidades Geomorfológicas

9.1.1.1.- Origen deposicional

9.1.1.2.- Origen marino

9.1.1.3.- Origen fluvial

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

9.2.3.- Geología Estructural

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

9.3.2.- Procesos Erosivos

9.3.3.- Peligros por Inundaciones

10.- GEOTÉCNIA

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

11.3.- Periodos Dominantes

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

ANEXO 1: Fichas de Calicatas

ANEXO 2: Fichas de Ensayo de Densidades

ANEXO 3: Fichas de Ensayo de Penetración Dinámica Ligera

ANEXO 4: Fichas de Posteo

ANEXO 5: Mapas formato A3

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

1.- INTRODUCCIÓN

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

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

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región sur ha sido afectada en varias oportunidades por eventos sísmicos de variada magnitud que han generado altos niveles de intensidad, puesta en evidencia con los daños observados post-sismo en cada ciudad y/o área urbana de la región (Silgado, 1978). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas ciudades y/o áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la 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, tsunamis, geofísica, geológica, geodinámica, geomorfológica y geotécnica. Los resultados que se obtienen permiten comprender que no hay suelo malo y que solamente se debe considerar el diseño y la construcción de viviendas y estructuras adecuadas para cada tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las ciudades y/o áreas urbanas antes indicadas deben comprender que existen tres (3) reglas para construir una casa sismorresistente (www.acerosarequipa.com):

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

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

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

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

2.- OBJETIVOS

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



Figura 1: Vista Panorámica de la Ciudad de Punta de Bombón.

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Punta de Bombón, “*Campiña Ecoturística Y Mar De Ensueño*”, es uno de los seis distritos que conforman la provincia de Islay en el Departamento de Arequipa, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa. Limita por el norte con el Distrito de Deán Valdivia, al noreste con el Distrito de Cocachacra, al sur con el Departamento de Moquegua y por el oeste con el Océano Pacífico. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia Católica forma parte de la Arquidiócesis de Arequipa.

Durante la dominación de Mayta Cápac y después de fundar Arequipa, uno de sus generales bajo por las pampas de Islay al mar y ocupó el valle de Tambo, quedó encantado de la belleza y de la fertilidad del suelo, fundó con permiso del Inca un tambo en el río Tampupalla —que así se llamaba el río por aquel entonces—, luego fundó los pueblos de “Cocachacra” (campo de coca), “Catas” (pequeña subida), entre otros. Posteriormente, fueron los incas quienes poblaron la zona con colonias como los Chullis, establecidos en el puerto de Chulli, oriundas de Chuhuitoc y a los Pumpus, oriundas de la meseta de Bombón (Junín). Ellos se establecieron en Punta de Bombón. Después de la conquista española, al nombre río Tampupalla le quitaron el “palla” y dejaron tan sólo el nombre de Tampu, que luego se convirtió en Tambo, en el lenguaje español.

Punta de Bombón es una extensión de tierra que sobresale en el mar como queriendo ganarle espacio y que entremezcla lo verde de su valle con lo azul de las aguas del mar. Después del terremoto de 1868, las familias arequipeñas se trasladaron a Punta de Bombón y dado su auge, paso a ser capital del distrito. En la actualidad, Punta de Bombón tiene en su plaza principal una hermosa iglesia que alberga al patrono de La Punta, El Señor de los Desamparados. Asimismo, en lo alto del pueblo se encuentra el majestuoso Cristo Mirador, desde donde se tiene una impresionante vista del valle y del mar. Hoy en día, el distrito de La Punta de Bombón es poseedor de hermosas playas como son: Punta de Bombón, Catas, Boca del Río, Cardones, Rincón de Corio, Punta Carrizales, Punta Lobos, Punta Cordel, Quebrada Honda, El Muelle, Agua Salada y las Cuevas, siendo las más visitadas las dos primeras, debido a su cercanía y porque otras, son para la gran mayoría desconocidas. Según el Censo del año 2008, Punta de Bombón tiene una población de 6000 habitantes.

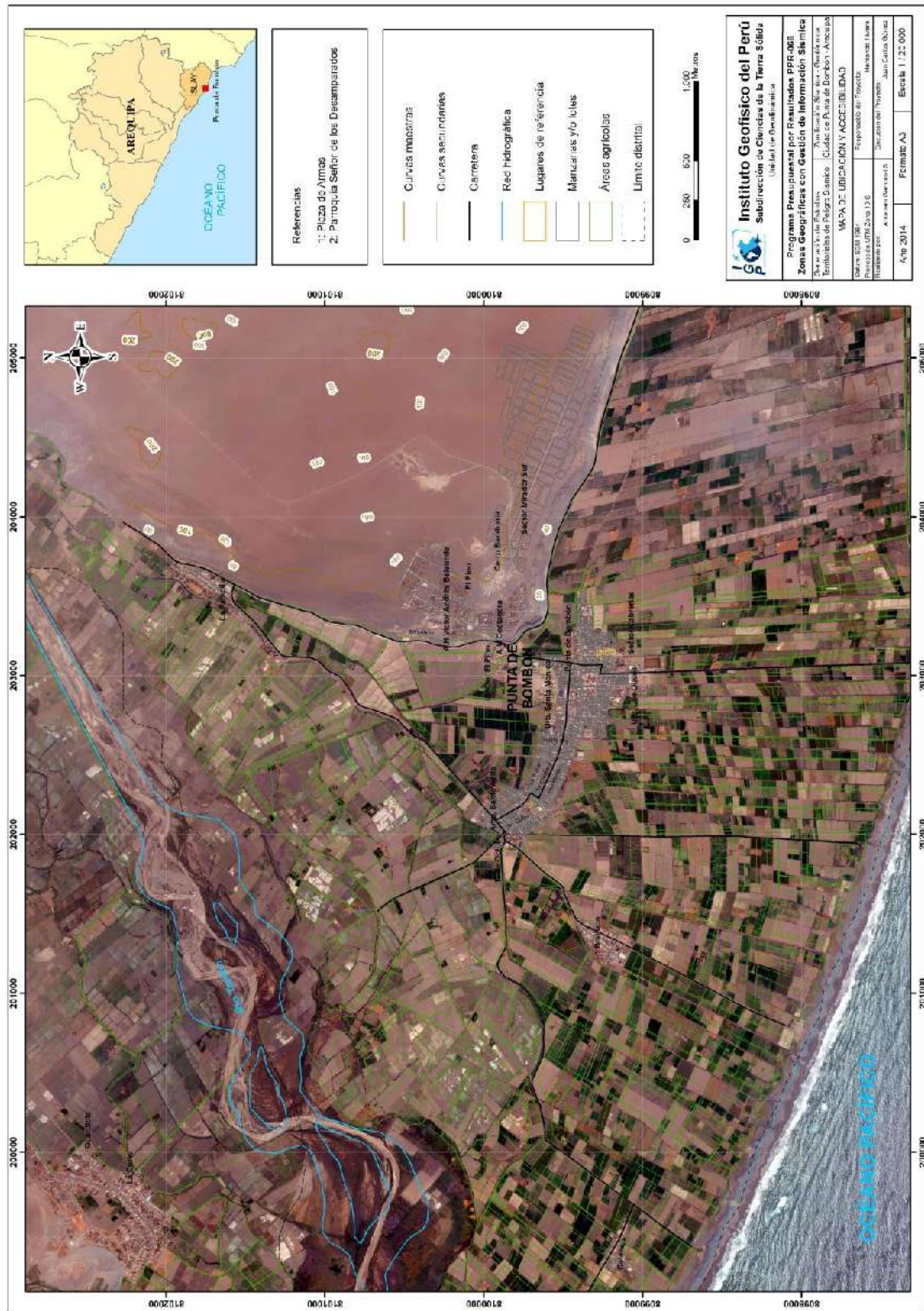


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Punta de Bombón

3.1.- Aspectos climáticos

Para determinar la condición climática en la ciudad de Punta de Bombón, se han tomado datos de la estación meteorológica Pampa Blanca ubicado a 13 Km en dirección SE con respecto a la ciudad. Los datos corresponden al año 2008 y su análisis permite considerar que la zona de estudio presenta un clima desértico, siendo sus temperaturas en los meses de verano entre 23.5°C a 31.5 °C. El periodo más frío corresponde al mes de julio con temperaturas de hasta 13.3 °C (Tabla 1 y Figura 3).

Tabla 1: Temperaturas máximas y mínimas medias mensual durante el año 2008 en la estación meteorológica de Pampa Blanca (SENAMHI, 2008).

Estación: Pampa Blanca												
Tipo Convencional Meteorológica												
Departamento		Arequipa		Provincia		Islay		Distrito		Cocachacra		
Latitud		17° 4' 7"		Longitud		71° 43' 22"		Altitud		100 m.s.n.m		
Mes	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
T° Max. media mensual (°C)	30.3	31.5	30.3	27.1	23.2	21.4	20.5	20.6	21.5	23.6	25.9	28.9
T° Min. media mensual (°C)	20.6	19.3	18.5	15.9	13.8	14.4	13.3	13.7	14.5	15.5	16.7	18.2
Humedad Relativa media mensual (%)	64.5	56.0	61.0	65.0	67.1	69.2	70.8	72.8	70.7	66.5	66.0	62.9
Humedad Relativa Max. media mensual (%)	79.6	74.2	79.6	82.2	79.1	77.5	78.0	82.1	81.4	79.3	75.8	75.2

Los datos de Humedad relativa media mensual registrados en la estación Pampa Blanca oscilan entre 56% en el mes de febrero y 72.8% en el mes de agosto. La máxima media mensual registrada en dicha estación fluctúa entre 74.2% en el mes de febrero y de 82.2% en el mes de abril (Tabla 1 y Figura 4).

Las precipitaciones en la ciudad de Punta de Bombón son escasas, tal como muestran los registros de la estación Pampa Blanca (Tabla 2). Una excepción podrían ser los años 1997 y 1998 en que debido al fenómeno de El Niño, se llegó a registrar precipitaciones de 15.1 mm y 7.3 mm respectivamente.

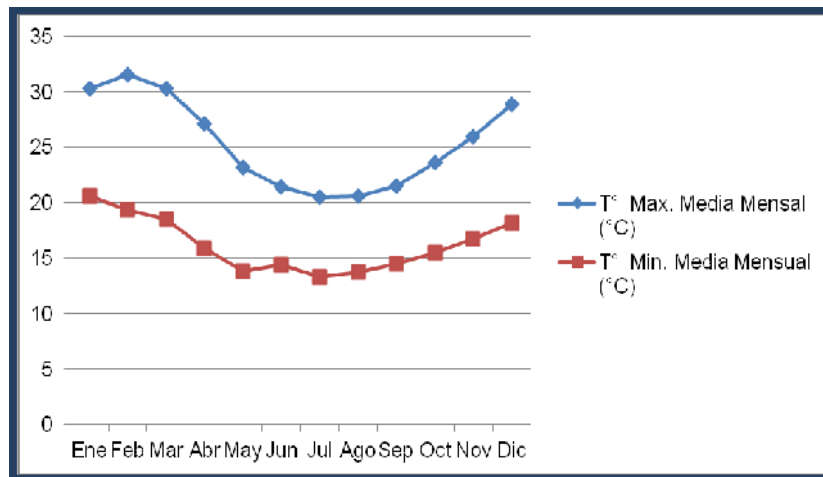


Figura 3: Índices de temperaturas registradas en la estación Pampa Blanca durante el año 2008.

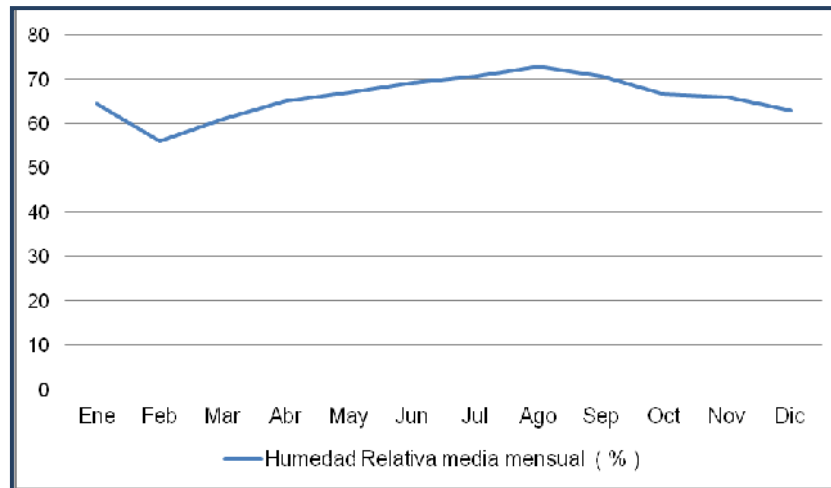


Figura 4: Humedad relativa media mensual en la estación Pampa Blanca durante el año 2008

Tabla 2: Precipitación acumulada anual en la estación Pampa Blanca, 1997 - 2007

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Precipitación (mm)	15.1	7.3	0.0	3.5	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0	1.5	3.3

4.- ANTECEDENTES

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

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

Considerando que el causante directo de los daños que producen los sismos en las ciudades, es la calidad de los suelos sobre el cual se encuentran las viviendas y otras obras de ingeniería, en el año 2005, la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora en la Gestión de Riesgos de Lima Metropolitana con el estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 Distritos de Lima y Callao (Microzonificación Sísmica), el mismo que se constituyó como información primaria y de base para cualquier otra investigación orientada a la gestión de riesgos (Figura 5). Como parte de este esfuerzo, el Instituto Geofísico del Perú, realiza estudios similares en los Distritos de Pucusana, Santa María, San Bartolo, Punta Negra, Punta Hermosa, Santa Rosa y El Agustino, permitiendo completar la información para el total de los distritos que conforman el área de la ciudad de Lima Metropolitana.

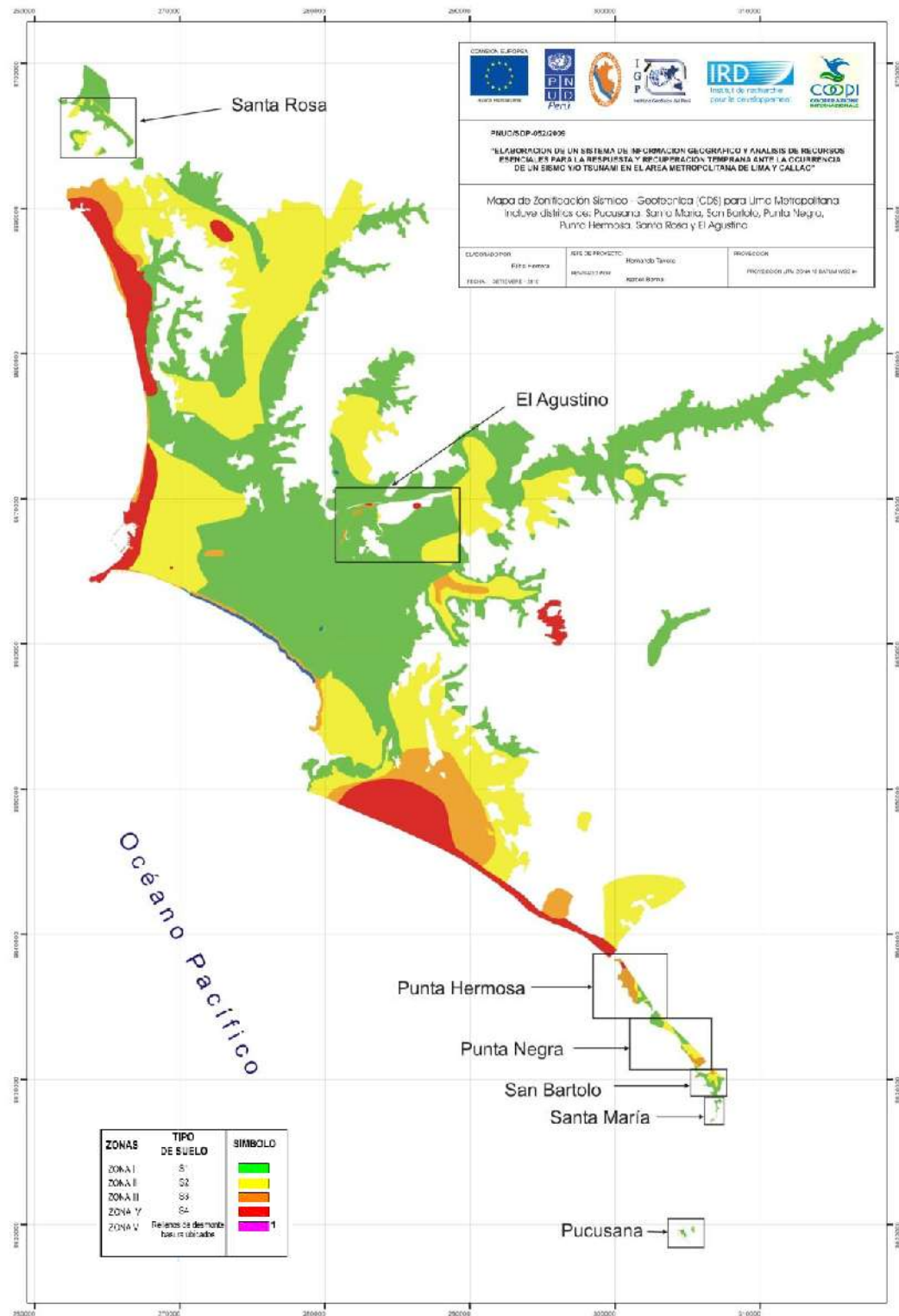


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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

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

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

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

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

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

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

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

6.- NORMA E.030, DISEÑO SISMORRESISTENTE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7.- METODOLOGÍA

El estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Punta de Bombón se ha realizado con información recolectada en campo y con la aplicación de las metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Sismicidad

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

7.2 Estudios de Peligro Sísmico

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

7.3.- Estudios de Tsunamis

Se caracteriza y cartografía el peligro relacionado con la ocurrencia de tsunamis asociados a un sismo de magnitud 8.5 Mw que pudiera afectar a la zona costera de la ciudad de Punta de Bombón (Figura 6). Conocido el modelo de fuente sísmica y obtenida las cartas de batimetría y topografía con alta resolución, el modelado numérico del tsunami se realiza con el algoritmo TUNAMI-N2 desarrollado por investigadores de la Universidad Tohoku de Japón (Goto y Ogawa, 1992). Los resultados obtenidos permiten conocer las zonas de inundación, el tiempo de llegada y

la altura de la primera ola de tsunami, información que permitirá orientar las medidas de gestión del riesgo en la zona de estudio.



Figura 6: Playas típicas en la zona costera de la ciudad de Punta de Bombón.

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

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

.- Levantamiento Geológico y Geomorfológico. Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características geológicas y geomorfológicas de carácter local, considerando bases de datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.

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

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

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

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

.- **Densidad de Suelo in situ** (Norma ASTM D1556): Consiste en evaluar la relación entre la masa de los suelos (sólidos y líquidos) y el volumen total de un suelo. Para tal objetivo se realiza el ensayo de densidad de campo con el uso del

método del cono, el cual permite conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Su aplicación permite conocer la compactación de las partículas que conforman el suelo, más compactos indica mayor resistencia a la deformación.

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

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

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

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

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

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

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

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

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

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

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

vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 7).



Figura 7: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: 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 PB-04 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en PB-21, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

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.

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.

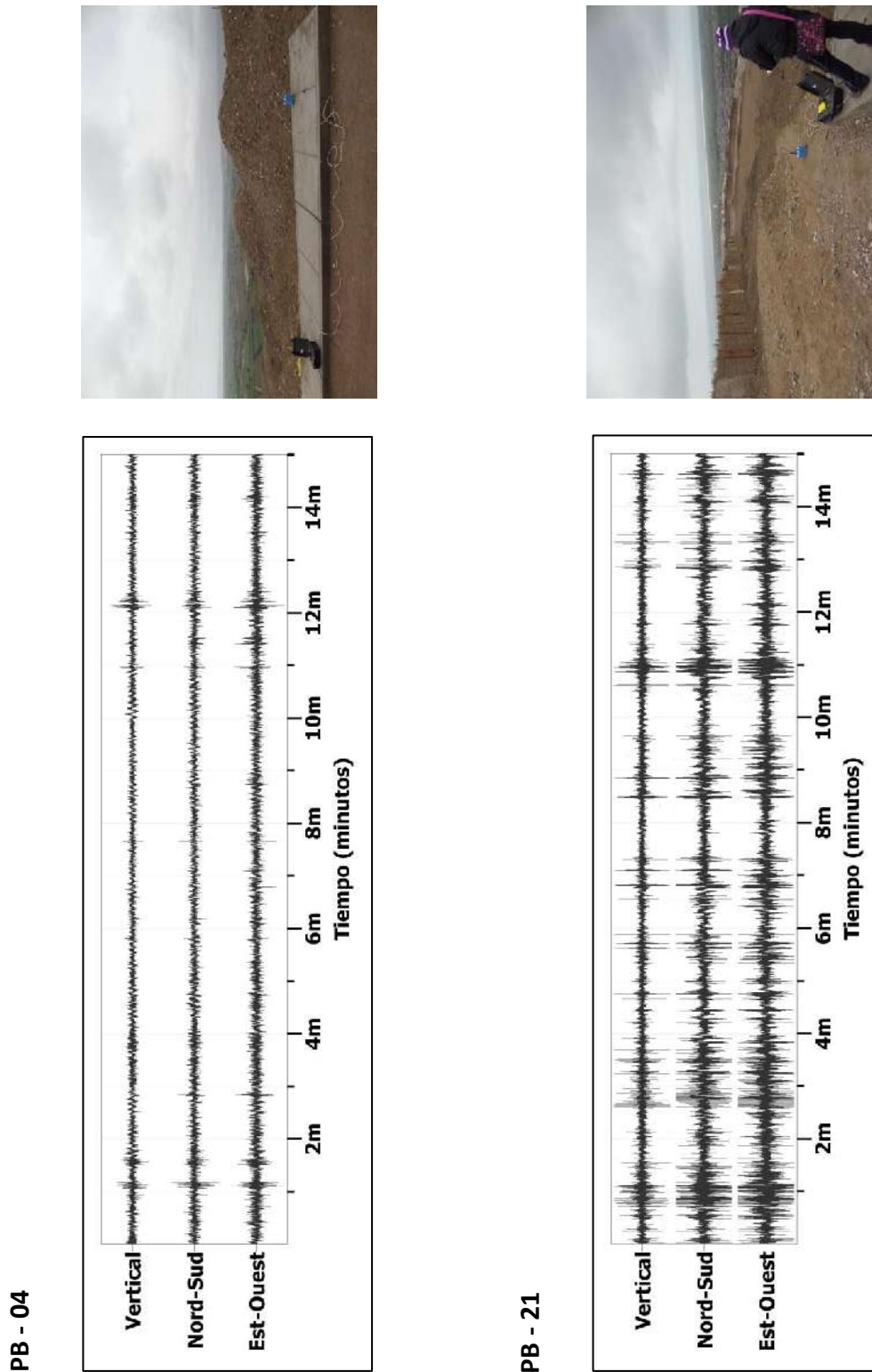
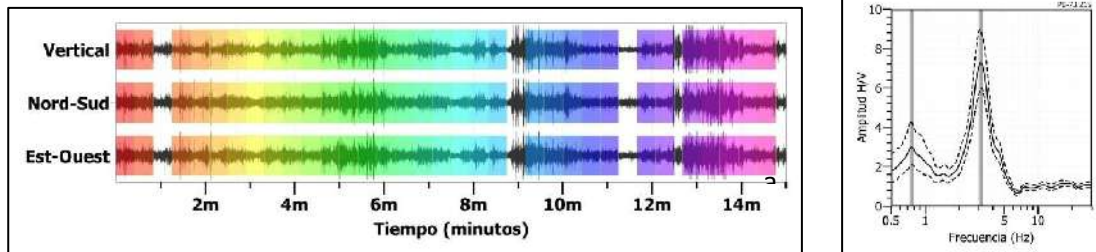


Figura 8: Ejemplos de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales y registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro sin presencia de ruido de fondo (PB-04) y otro con ruido transitorio (PB-21). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal sísmica registrada en cada punto..

.- 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.

PB - 73



PB - 158

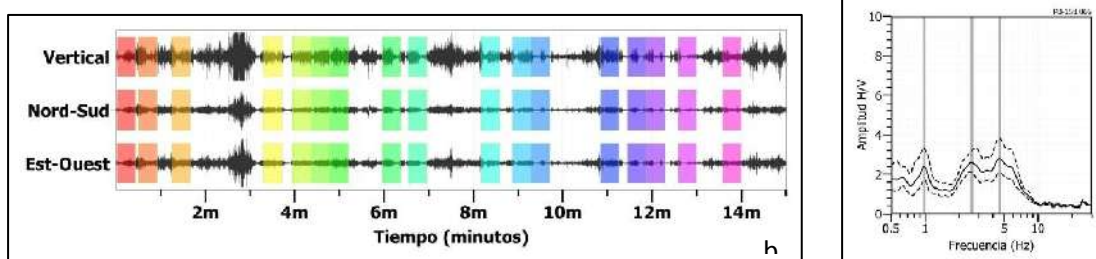


Figura 9: Selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. PB-73: Registros y razón H/V donde se identifica dos pulsos de frecuencias predominantes, siendo el segundo de mayor amplitud. PB-158: Registros y razón H/V en el cual la frecuencia predominante presenta hasta tres picos 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 (Figura 10). Con este procedimiento se pretende conocer la velocidad de las ondas de corte (ondas S) utilizando el método MASW; es decir, conocer los cambios de velocidades a lo largo de los diversos estratos existentes en el subsuelo.

La aplicación de esta técnica permite determinar las características físicas del subsuelo de manera indirecta, basándose en el comportamiento de las ondas sísmicas al pasar por distintos medios, permitiendo de este modo, definir el perfil de velocidades de las ondas de corte (V_s) que caracteriza a dicha línea. La interpretación de la información recolectada proporciona una curva de dispersión (velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia) para las ondas superficiales, ya que estas conservan hasta el 90% del valor de la velocidad de las ondas de corte (V_s). Luego mediante un procedimiento de cálculo iterativo inverso se obtiene el perfil de velocidad de las ondas de corte (V_s) y ondas de volumen (V_p) para el punto medio de cada línea de estudio.



Figura 10: Ejemplo de la disposición del equipo de refracción sísmica en la ciudad de Punta de Bombón

.- **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).

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



Figura 11: Ejemplo de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Punta de Bombón

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

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

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

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

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

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

limosos y aquellos con contenido de carbón, los cuales se comportan como buenos conductores de corriente.

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

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

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS

La ciudad de Punta de Bombón se encuentra ubicada en el borde occidental de la región sur del Perú; por lo tanto, ha sido, es y será afectada en el tiempo por sismos de variada magnitud que pueden o no causar daños en superficie. Desde este punto de vista, es importante conocer las características de la actividad sísmica en la región, ya que puede presentarse el escenario de que sismos de gran magnitud generen tsunamis. Del mismo modo, se debe estimar de manera probabilística los posibles valores de aceleración a presentarse en el futuro ante la ocurrencia de sismos de gran magnitud.

8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región sur presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Figura 12). Una de estas ciudades es Punta de Bombón y según información histórica contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1604 y 1868 los que causaron daños importantes en las viviendas de adobe y madera construidas por los primeros pobladores en estas ciudades emergentes. El tsunami de 1868 parece ser, el peligro adicional al sismo que causó mayor daño en la zona, en razón de estar sus playas prácticamente al nivel del mar. Estos sismos causaron en la región sur del Perú intensidades del orden de IX-VIII en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978).

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

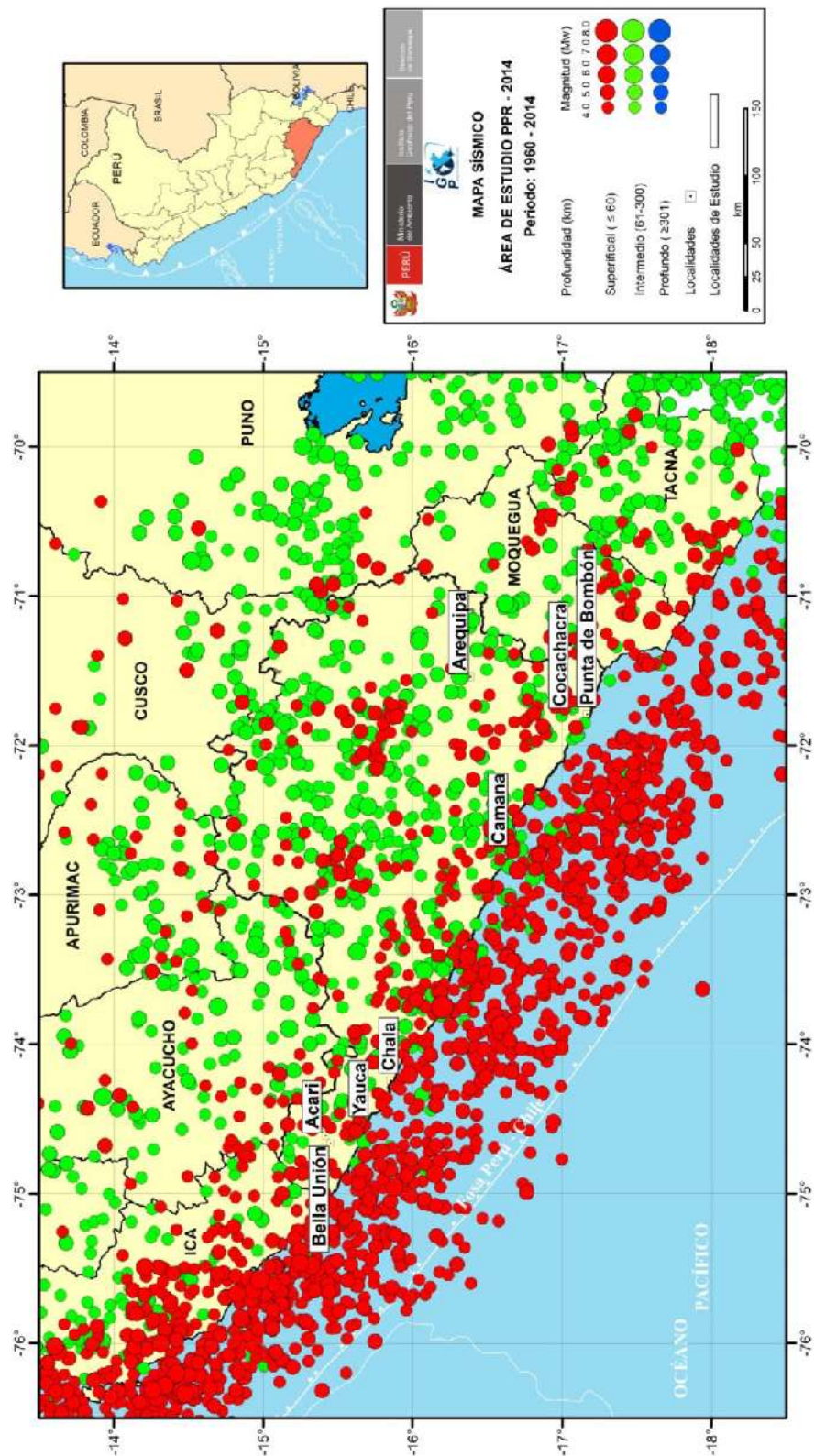


Figura 12: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

importantes réplicas y de ellas, dos presentaron sus epicentros frente a la ciudad de Punta de Bombón, produciendo intensidades de VII (MM) y daños en varias viviendas de la ciudad. En este caso el tsunami que siguió al sismo mayor, presentó mayor intensidad y daños en el área costera de la ciudad de Camaná; mientras que, el comportamiento anómalo del mar en las playas de Punta de Bombón causó efectos menores. Las estadísticas de daños en la ciudad de Punta de Bombón indican el colapso de 429 viviendas, 434 con rajaduras de importancia y daños en el puente Freyre que mantuvo aislada a la ciudad por varias semanas (Figura 13).

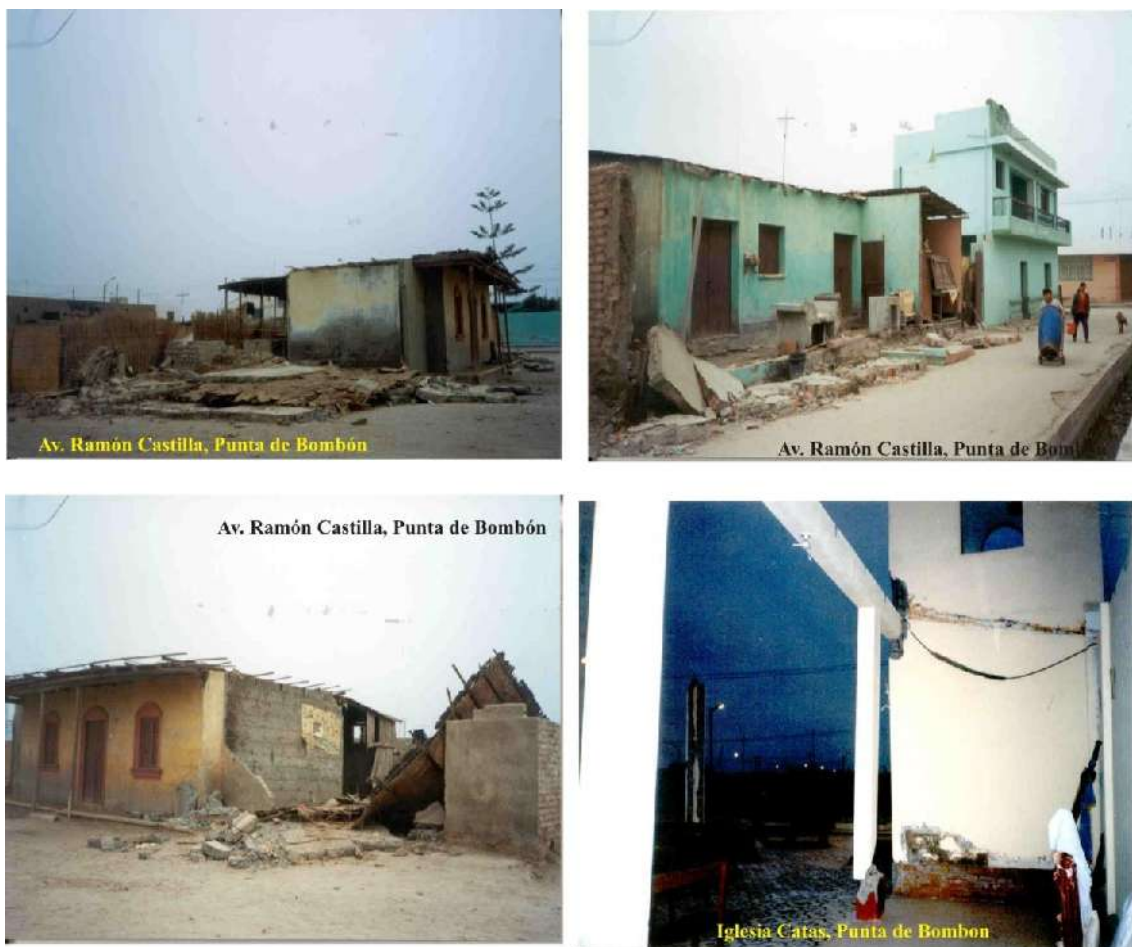


Figura 13: Ejemplos de daños en estructuras en la ciudad de Punta de Bombón debido al sismo del 2001

Finalmente, en la Figura 14 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo 1961 – 2014, llegándose a observar que la ciudad de Punta de Bombón, históricamente ha sido afectada por sismos que han producido en superficie intensidades del orden de VIII (MM); por lo tanto, es una ciudad expuesta al alto riesgo para el caso de sismos y tsunamis.

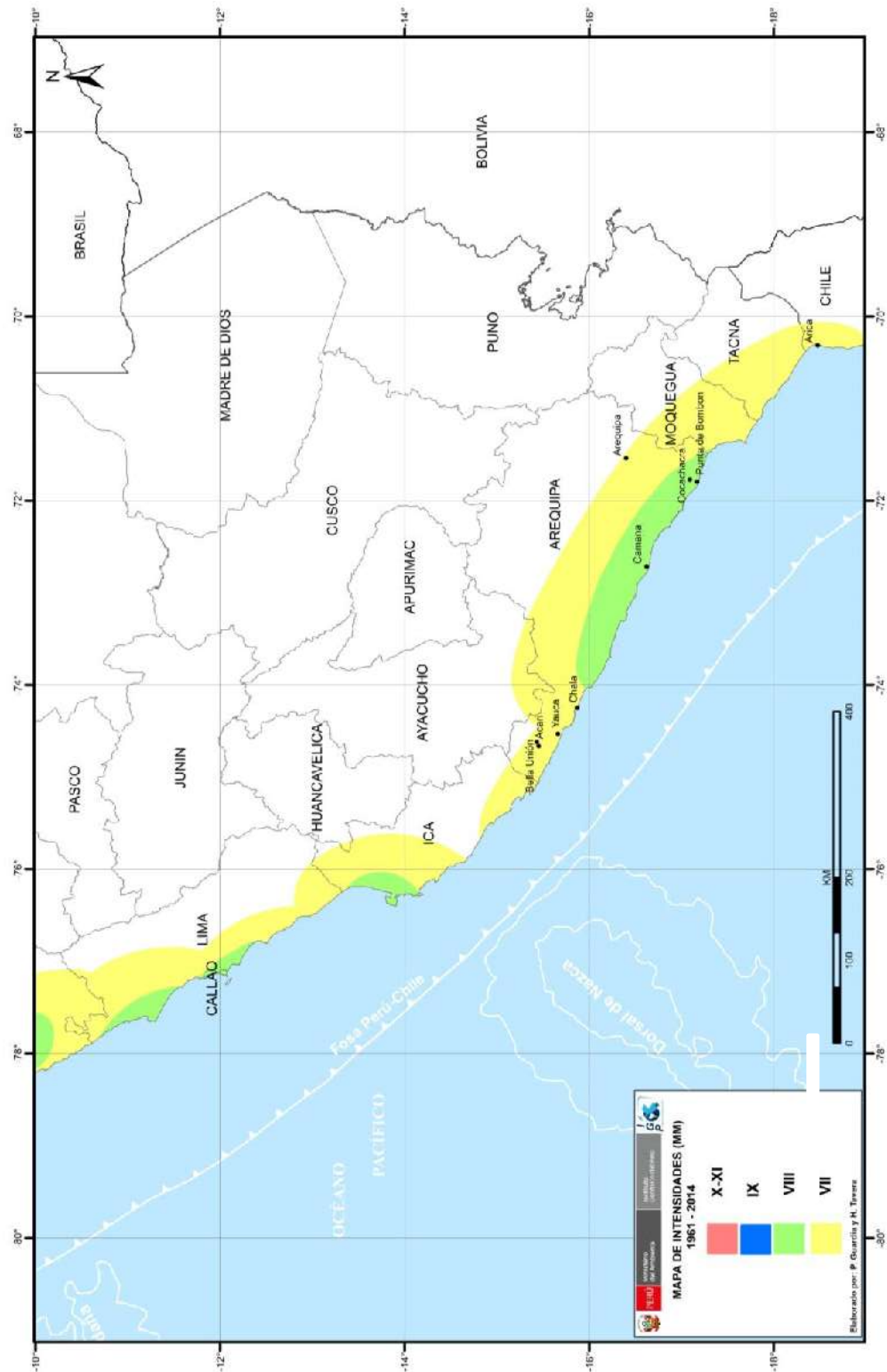


Figura 14: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

Por otro lado, en reciente informe elaborado por Tavera (2014), se indica que el sismo ocurrido en el año 2001 habría liberado aproximadamente el 60% de la energía acumulada en la zona costera de la región sur del Perú desde el año 1868; por lo tanto, la energía restante debe ser liberada por otro evento sísmico que involucra un área de ruptura por debajo de la península de Ilo, y que produciría en la ciudad de Punta de Bombón niveles altos de sacudimiento del suelo, quizás similares a los producidos por el sismo del 2001. Esta información es corroborada por estudios realizados por Chilif et al (2011) y Villegas-Lanza (2014) sobre la distribución de asperezas en la costa sur del Perú. En la Figura 15, se muestra la distribución de asperezas en el borde occidental de la región sur, siendo la codificada como A-3 la que tiene una alta probabilidad de generar un evento sísmico de gran magnitud en la región. Dentro de este escenario, también se debería considerar la aspereza A-4, que por las dimensiones de su área, el sismo a producirse afectaría a la zona de estudio.

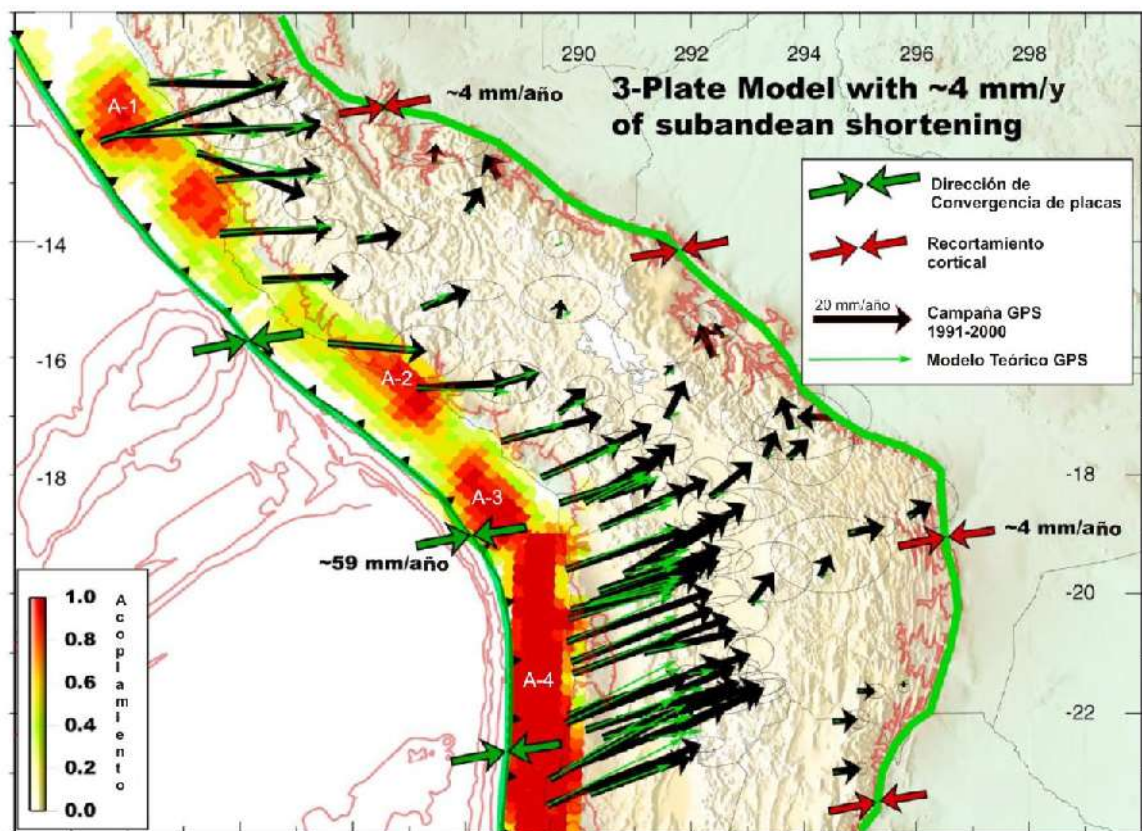


Figura 15: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de hasta cuatro asperezas (Chlieh et al, 2011).

8.2.- Peligro Sísmico

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

Para el área que abarca la ciudad de Punta de Bombón se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 480 a 500 gals (Figura 16), 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 con el sismo de Arequipa del 2001 (Tavera, 2001) y Pisco 2007 (Tavera, 2008).

8.3.- Tsunamis

La información histórica sobre tsunamis ocurridos en la región sur del Perú y que afectaron, en diferente grado, a las zonas costeras es bastante numerosa y puede ser consultada en Silgado (1978) y Carpio y Tavera (2002). Estos sismos presentaron magnitudes superiores a 7.0 Mw y produjeron niveles de intensidades en la zona epicentral del orden de VIII (MM) a más. En general, los tsunamis afectaron a la zona costera de todo el departamento de Arequipa con olas de hasta 8 metros de altura. Para el caso del tsunami del año 1868, olas de 12 metros de altura causaron efectos importantes en los puertos y localidades costeras, desde Pisco hasta Iquique en Chile. Según Silgado (1978), en la localidad de Arica, la tercera ola alcanzo alturas de 16 metros y movilizó corbetas tierra adentro hasta distancias de 300 metros y que luego, el tsunami del sismo de 1877 las recuperó para dejarlas cerca de la playa. Por otro lado, los tsunamis producidos por los sismos de Perú en los años 1996, 2001 y 2007, así como los de Chile en los años 2010, 2014 y 2015, produjeron localmente olas con alturas menores a 8 metros, no produciendo daños a distancias mayores, tal como es el caso de la ciudad de Punta de Bombón.

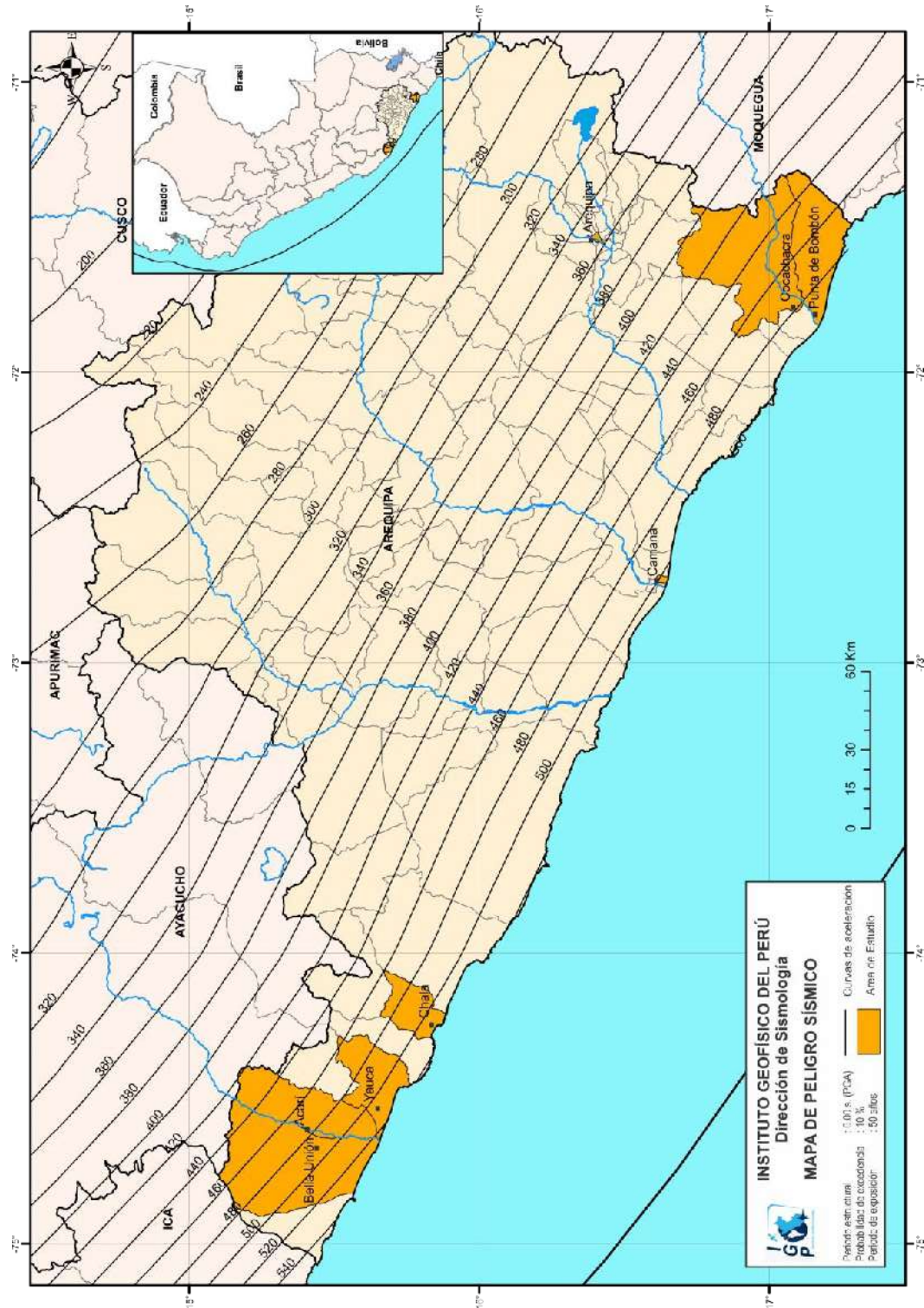


Figura 16: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Para generar escenarios probables de tsunamis en la zona costera de la ciudad de Punta de Bombón, se considera la metodología de modelamiento numérico haciendo uso de la siguiente información:

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de las cartas 321 y 322, además de sondeos realizados por la Dirección de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú (DHN), siendo su muestreo de 30 metros. La topografía local fue construida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) Aster GDEM obteniéndose una resolución espacial de 30 metros.

.- Modelo de fuente sísmica: Se considera como escenario un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a la zona costera de Punta de Bombón y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del sismo ocurrido en el año 2001 (sismo de Arequipa). Otros parámetros, como las dimensiones del área de ruptura fueron estimadas utilizando las relaciones de Papazachos (2004).

.- Modelado numérico de tsunamis, TUNAMI-N2: El proceso de modelado numérico requiere tener el conocimiento sobre los procesos físicos de las tres fases de un tsunami: generación, propagación e inundación. Para el modelado se utiliza el algoritmo TUNAMI-N2 (Goto y Ogawa, 1992). Para una determinada condición de la fuente sísmica, el modelo TUNAMI-N2 simula la generación, propagación e inundación del tsunami con una exactitud bastante alta (comparación con muchos tsunamis históricos). Así mismo, proporciona información sobre el tiempo de arribo de la primera ola y su altura en una determinada región costera, además de los niveles de inundación horizontal.

Los resultados obtenidos en la simulación numérica del tsunami indican que las primeras olas llegarían en 20-22 minutos después de ocurrido el sismo y con alturas del orden de 9 metros entre las playas de Catas y Bombón. De acuerdo a los resultados obtenidos, la mayor longitud de inundación se produciría a lo largo del río Tambo con distancias de hasta 4.5 km y volúmenes de agua que alcanzarían los 6 metros de altura. De acuerdo a las Figuras 17 y 18, el área urbana de la ciudad de Punta de Bombón, podría ser afectada en menor grado por el tsunami. Los niveles de inundación horizontal y la altura del volumen de agua, tierra adentro con respecto a la línea de costa y para varios puntos de referencia, se detalla en la Tabla 3.

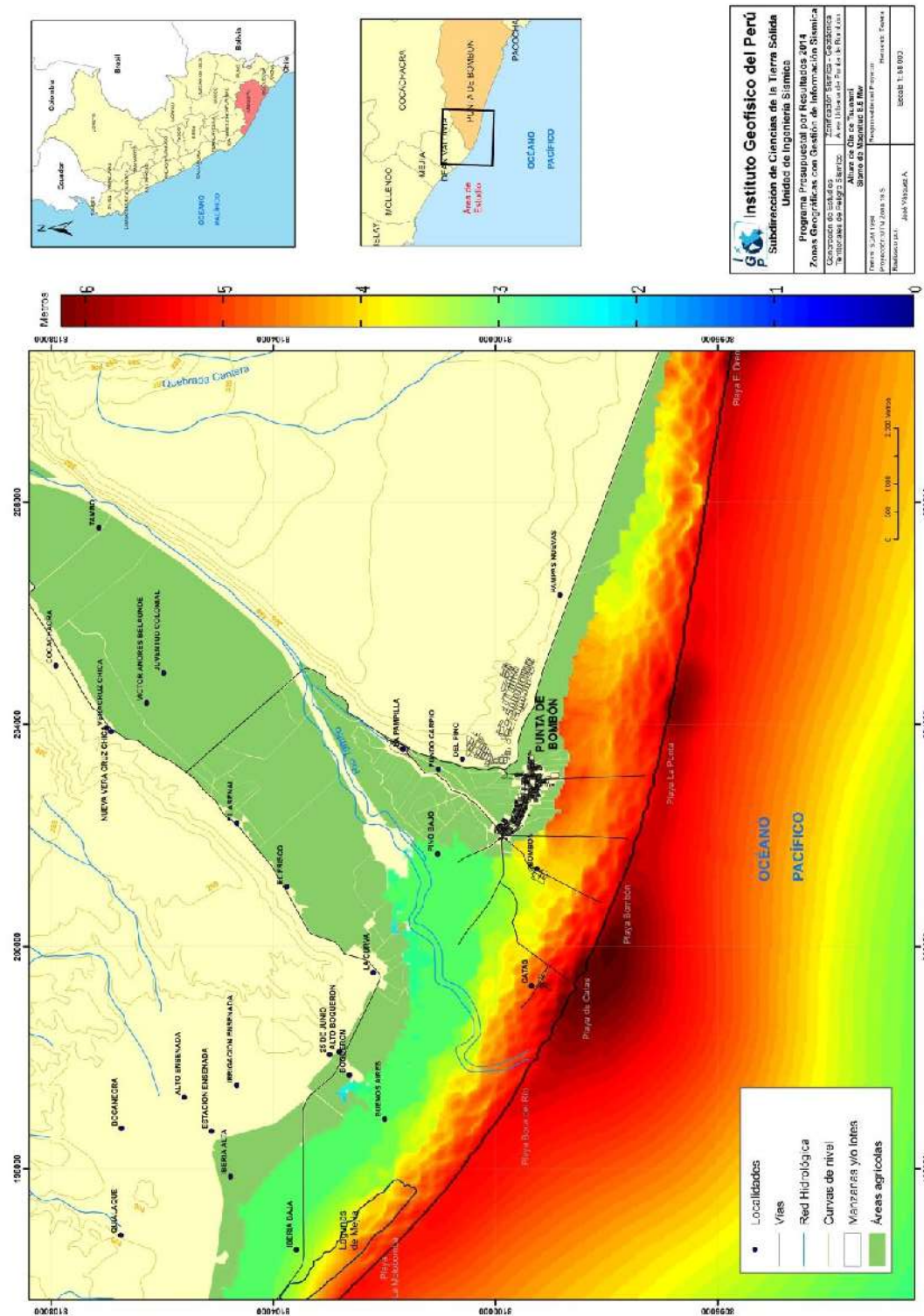


Figura 17: Altura de inundación por tsunami en la zona costera de la ciudad de puna de Bombón

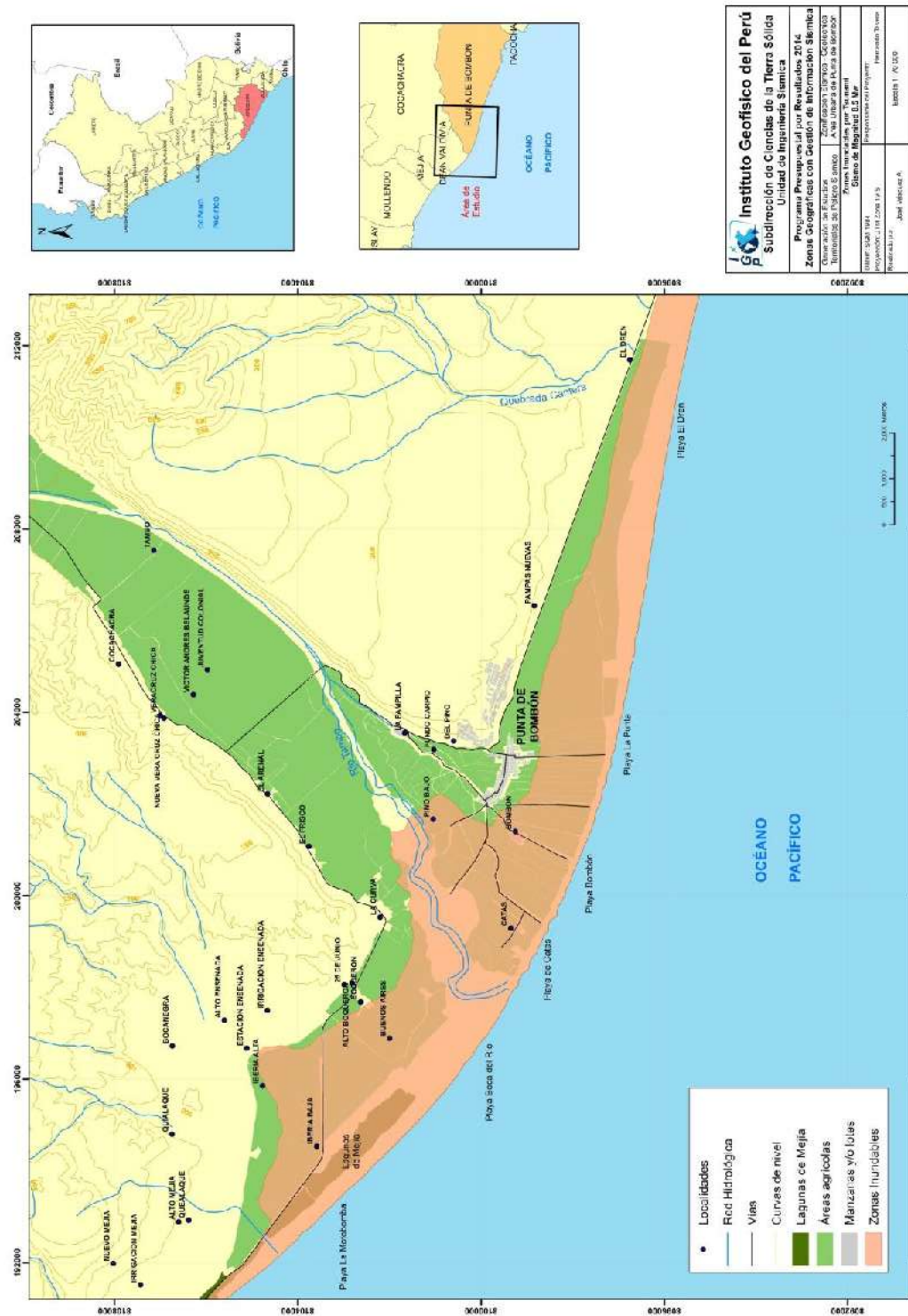


Figura 18: Inundación horizontal por tsunami en la zona costera de la ciudad de Punta de Bombón

Tabla 3: Longitud y altura de inundación de tsunami en la zona costera de la ciudad de Punta de Bombón

PUNTA DE BOMBON		
Áreas afectadas	Altura de Inundación (m)	Longitud de Inundación (km)
Iberia Baja	3.5	2.4
Playa Motobomba	5.5	2.4
Buenos Aires	5.5	2.3
Playa Boca del Rio	6	2.3
Rio Tambo	6	4.5
Playa de Catas	6.5	4
Playa Bombón	6.5	2
Bombón	4.5	2
Playa La Punta	6	1.5
Playa El Dren	6	1.2

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en la ciudad de Punta de Bombón 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 y plano de pendientes a fin de delimitar las características del terreno, los mismos que fueron verificados y validados durante el trabajo de campo realizado en la ciudad de Punta de Bombón. El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:25000 para un área de 56 km², y se concluye que la ciudad de Punta de Bombón se asienta sobre una terraza fluvial con cotas menores a 25 msnm (Figura 19).

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT. La ciudad de Punta de Bombón se encuentra sobre una terraza fluvial con pendientes entre 2° y 4°; es decir, una superficie casi plana (Figura 20).

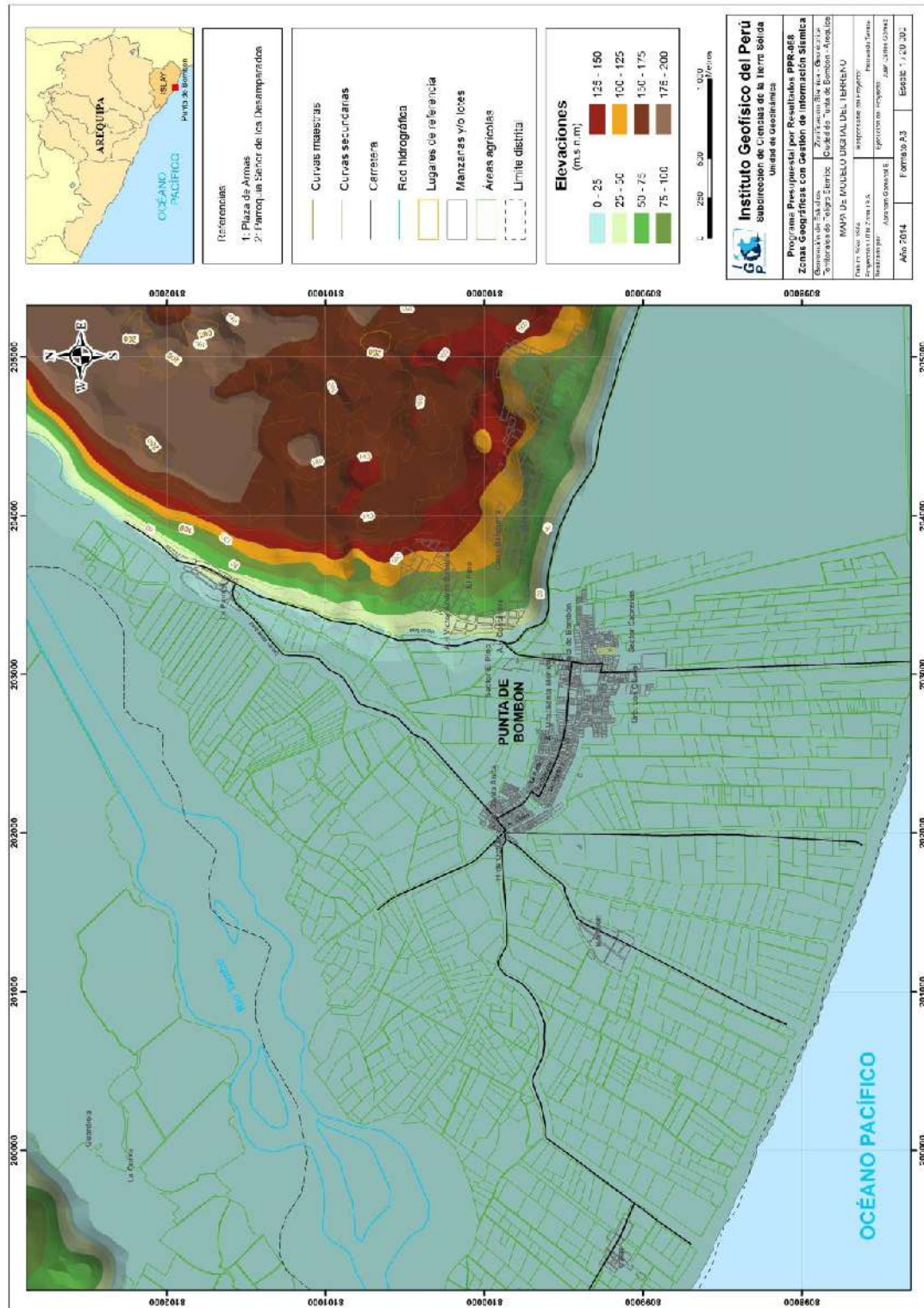


Figura 19: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Punta de Bombón y alrededores

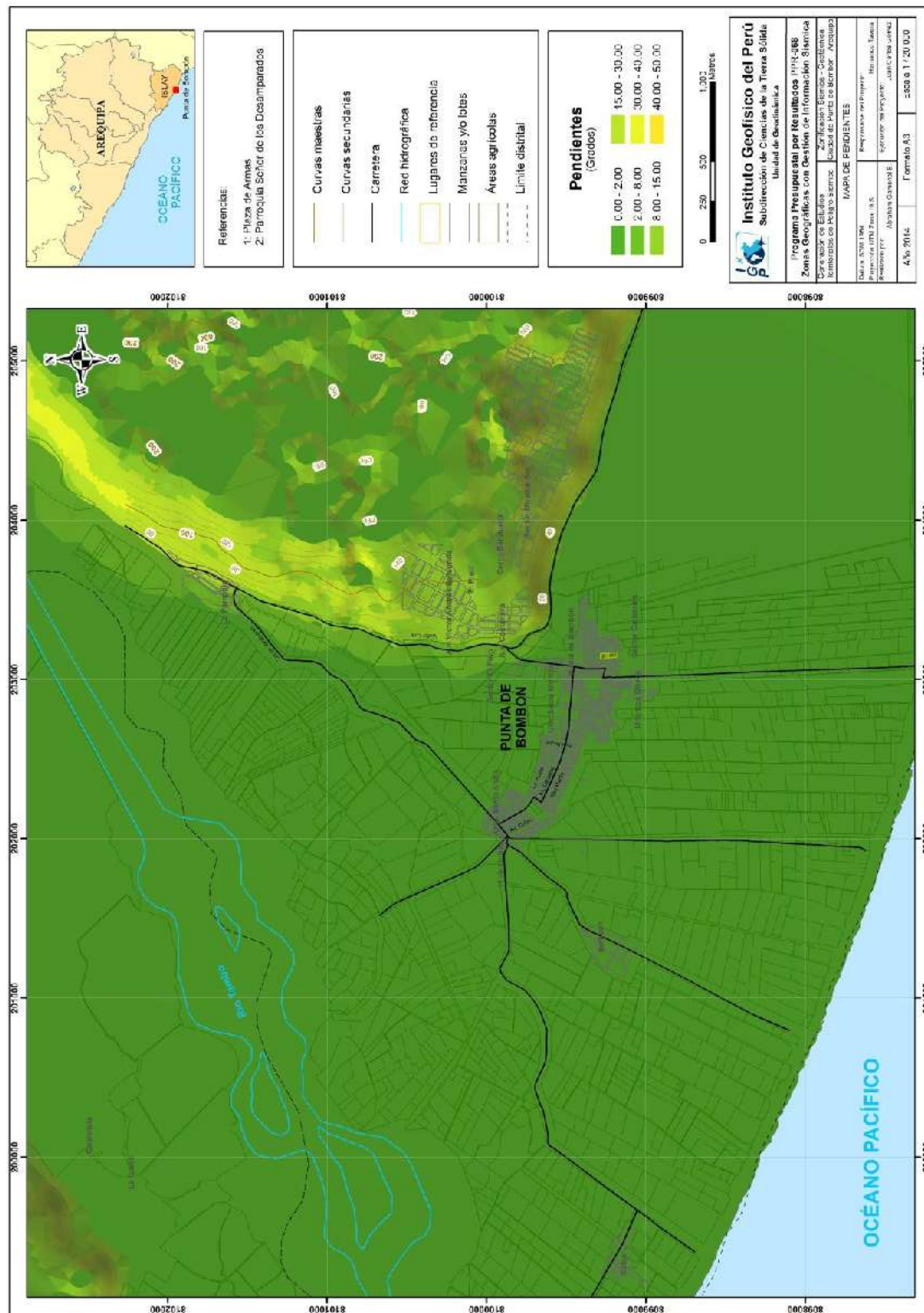


Figura 20: Mapa de pendientes para la ciudad de Punta de Bombón y alrededores

9.1.1. Unidades Geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Punta de Bombón se ha identificado la existencia de 6 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 21):

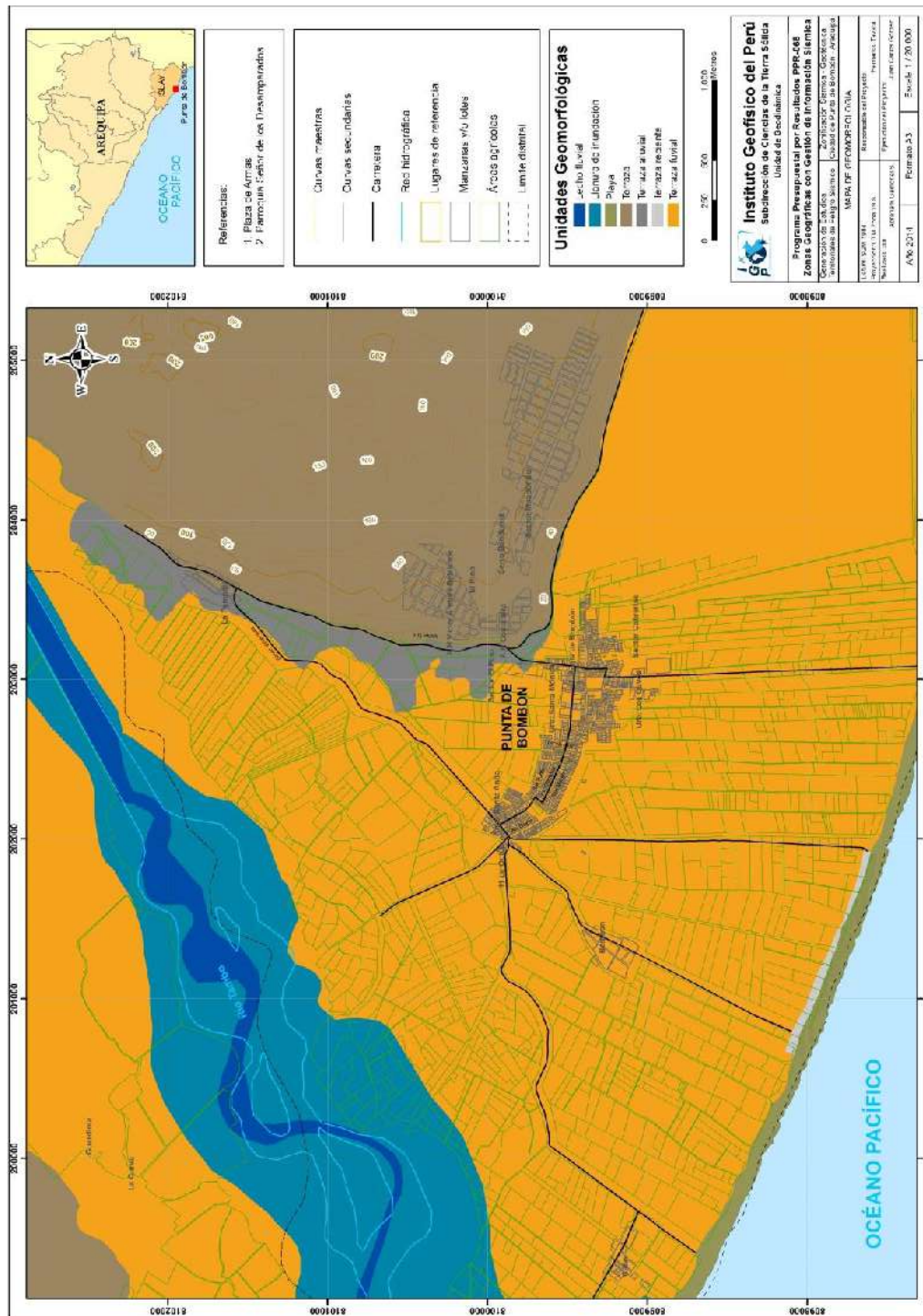


Figura 21 Mapa geomorfológico de la ciudad de Punta de Bombón y alrededores

9.1.1.1.- Origen depositacional

En el desarrollo de los valles modelados por la acción erosiva de las corrientes fluviales, uno de los episodios más importantes es la formación de las "Planicies aluvionales". El río arrastra los materiales arrancados de la parte superior de la cuenca y los lleva consigo a sitios en donde, por una determinada circunstancia, pierde velocidad y se remansa, viéndose obligado a dejar su carga detrítica para luego esparcirse sobre una llanura de variada extensión. Este proceso, es casi siempre, un cambio en la constitución o disposición de las rocas que forman el valle, por lo general de mayor resistencia a la erosión, pero que da forma a aberturas que facilitan la deposición y acumulación de aluviones. El tránsito de la corriente del río permite que estas superficies se ahonden de tal manera, que las planicies aluviales quedan colgadas a uno y otro lado del valle, dando lugar a la presencia de terrazas.



Figura 22: Catas, Bombón y La Punta se encuentran asentadas sobre terrazas fluviales.

.- **Terraza fluvial:** Estas formas de relieve se originaron por la acumulación fluvial del río Tambo; es decir, son terrazas antiguas sobre el lecho del río. Están formadas por bancos estratificados de gravas redondeadas a subredondeadas de hasta 10cm de diámetro en una matriz arenosa, sobreyacen a estas gravas

una capa de 0.5 metros de arena fina limosa de color gris clara a oscura, grano grueso a medio, con proporciones mínima de arcilla. Este material procede de grandes distancias, desde aguas arriba del río Tambo. Su pendiente es de 2° aproximadamente; es decir, prácticamente planas. La terraza fluvial presenta una dirección de NE-SO, debido a que el principal agente modelador es el río Tambo. Las terrazas se encuentran a 2.3 km en dirección Noreste del área urbana de la ciudad de Punta de Bombón, (Figuras 22 y 23). En la actualidad, el 80% de la población de Catas, Bombón y La Punta se encuentran asentadas sobre estas terrazas. Finalmente, el área de estudio abarca solamente el 44% del total de la superficie formada por terrazas.



Figura 23: Terraza fluvial visto desde el Mirador Cristo Rey, ubicado en el Cerro Bandurria. Se observa que el principal agente modelador de las terrazas es el río Tambo, inclusive llega a dividir a las áreas urbanas de La Punta y La Curva.

.- **Terraza aluvial:** Esta unidad se extiende de NE a SO a lo largo de la margen izquierda del río Tambo y consiste en un relieve plano que corresponde a una antigua llanura de inundación del río antes mencionado (acumulación de depósitos aluviales y actividad antrópica). El salto de la terraza aluvial abarca una altura aproximada de 5 metros con respecto a la actual terraza fluvial, tal como se evidencia en La Pampilla, asentada sobre esta terraza. La carretera principal que une Cocachacra y La Punta, también se encuentra asentada sobre

esta terraza y el 70% de la misma, se utiliza como áreas agrícolas (Figuras 24 y 25).



Figura 24: Sobre las terrazas aluviales se encuentra asentada el área urbana de La Pampilla. La unidad se encuentra limitada por terrazas fluviales y marinas.



Figura 25: Sobre las terrazas se ha construido la carretera que une a las ciudades de Cocachacra y Punta de Bombón.

9.1.1.2.- Origen marino

Corresponden a terrazas marinas que reflejan el efecto del mar en largos períodos geológicos. En el Paleozoico Superior, la costa sur se hunde y queda cubierta por el mar, luego en el Triásico Inferior como parte del ciclo andino, la costa se levanta. En el Jurásico se desarrolla un nuevo hundimiento quedando "bañado" literalmente, la costa sur y el mar deposita una importante secuencia de limolitas y areniscas, para luego, durante el Cretácico Superior, emerger acompañadas de una intensa actividad volcánica. Durante el Cretácico Superior y Cenozoico inferior, la costa sur se encontraba sobre el nivel del mar, dando origen a las terrazas marinas, que son vestigios de las oscilaciones del mar en épocas ya descritas anteriormente. Finalmente, durante el Cuaternario se desarrollaron en el planeta las glaciaciones separadas por épocas de derretimiento de los hielos que hacían subir el nivel de las aguas marinas.



Figura 26: Corte de talud en la cual se aprecia la composición estratigráfica de las terrazas marinas. Presenta una altura de 81 metros de altura y está compuesta por gravas.

- Terrazas marinas: Esta unidad se encuentra al NE de la ciudad de Punta de Bombón y corresponde a una superficie plana ligeramente inclinada y limitada por acantilados, terrazas fluviales y aluviales que se encuentran por encima del nivel actual del mar. Las terrazas marinas se prolongan hacia el SE de la ciudad y superficialmente están cubiertas por materiales aluviales, arenas o arcillas,

aunque en la parte inferior de algunos sectores, se observa la presencia de gravas y arenas bien estratificadas que contienen conchas marinas de la época de su formación. Estas terrazas se encuentran sobre el 11% del área total de la ciudad de Punta de Bombón, Figuras 26 y 27.



Figura 27: Las terrazas se prolongan hacia el SE de la ciudad de Punta de Bombón, constituyendo extensas pampas ubicadas en ambos márgenes del río Tambo.

9.1.1.3.- Origen fluvial

El más importante de todos los procesos geológicos que actúan sobre la superficie terrestre es el agua de escorrentía (Morisawa, 1968), es causante de gran parte del relieve, además de formar llanuras de inundación en las que se construyen muchas de las ciudades. Los ríos son esencialmente agentes de erosión y transporte que suministran a los océanos agua y sedimentos procedentes del continente.

*.- **Lecho fluvial:** Define al espacio ocupado por las aguas, pudiendo ser de tipo lecho mayor (máximo, cuando se inunda), lecho ordinario (cauce normal) y canal de estiaje (por debajo del nivel, sumergido). En la zona de estudio el lecho fluvial corresponde al río Tambo, lugar por donde circulan las aguas dentro del valle en diversos y reducidos canales. En el lecho se han depositado materiales fluviales*

de origen ígneo con diferentes diámetros envueltos en una matriz arenosa. Los lechos son altamente dinámicos y cambiantes debido a la continua erosión (Figuras 28 y 29). El lecho fluvial representa el 3.5% de la superficie considerada en el área de estudio.



Figura 28: Lecho fluvial conformado por gravas de rígen ígneo en matriz arenosa que se acumulan en pequeñas lomas para obstruir el paso del agua.



Figura 29: Las líneas amarillas delimitan el lecho fluvial. Se evidencia algunos sectores con vegetación de monte ribereño. Estos terrenos no son favorables para la agricultura.

*.- **Llanura de inundación:** considera la superficie adyacente a un curso fluvial y que frecuentemente suele inundarse. Su ancho está en función del cauce del río, y se encuentra situada desde el Puente Freyre hasta el puente Pampa Blanca, ubicado a 3 km al NE de la ciudad de Punta de Bombón. La llanura presenta un ancho variable, de 350 hasta 500 m en la margen derecha del río Tambo (Figura 21). La litología predominante es limo arcillosos, lentes de arenas y en menor proporción gravas con clastos de hasta 3" de diámetro, redondeados dentro de una matriz arenosa. Estas llanuras son usadas en actividades agrícolas. y representan el 13.4% del área de estudio.*

*.- **Playas:** Son acumulaciones de arena, gravas o una mezcla de ambas, situadas en el borde costero con anchos variables formados por el continuo oleaje. El transporte de sedimentos hacia la playa puede ser de origen fluvial, por erosión de los acantilados, sedimentos del fondo marino, eólico y/o antrópicos. Las playas de Catas, Bombón y La Punta, presentan anchos de 15 a 170 metros y están compuestas de arenas de grano grueso y fragmentos de conchas marinas mezcladas con arcillas. En algunos sectores de estas playas, se tiene presencia de materiales de relleno antrópico. Esta geoforma constituye el 2.7% de la superficie del área de estudio (Figuras 30 y 31).*



Figura 30: Playa La Punta ubicada en el extremo oeste de la ciudad de Punta de Bombón. Las obras de ingeniería se encuentran sobre estos depósitos sin considerar reforzamiento estructural.



Figura 31: Playa Catas ubicado en el extremo SO de la ciudad de Punta de Bombón. Se encuentra rellena con material de origen antrópico (desmontes).

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 crea 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. Por otro lado, el campo de aplicación de la geología es muy variado; sin embargo, en el presente estudio se hace incidencia en el reconocimiento de las propiedades físicas de las rocas y suelos sobre los cuales se asientan las áreas urbanas. Es de importancia reconocer a las distintas estructuras que se presentan alrededor de las ciudades, las geoformas existentes y los eventos geodinámicos internos y externos a los que están expuestos, ya que solo así, se podrá determinar el comportamiento del terreno ante la presencia de los distintos procesos geológicos que puedan suscitarse.

Para el estudio geológico de la ciudad de Punta de Bombón, se hace uso de la información contenida en el compendio de geología regional de INGEMMET (a escala regional 1:100000), complementado con la información sobre la geología local obtenida en base al cartografiado realizado en campo (escala 1:5000). Se debe describir las principales unidades litológicas aflorantes y sus características más resaltantes; información importante para cualquier estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica.

9.2.1- Geología Regional

Para describir las principales unidades geológicas, se tomó como base la información regional descrita por Guevara (1961) en el Cuadrángulo de Punta de Bombón, Hoja: 35s a escala 1/100000, actualizada por Sánchez (2000). Según la columna geológica, las principales unidades que afloran en las localidades de la Punta de Bombón y Cocachacra, vienen del Precámbrico hasta el Cuaternario, conformando una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas. Algunas de estas unidades se encuentran atravesadas por numerosas masas de rocas intrusivas que se describirán más adelante.

En la zona de estudio, el complejo Basal de la Costa (Precámbrico) es la unidad más antigua y esta compuesta principalmente por gneis e instruida por granitos, granodioritas y dioritas. El gneis se presenta como una roca compacta, ligeramente intemperizada, de color gris verdoso con bandas y lentes de ortosa que le da un tono gris rojizo o rosado. Por lo general, muestran una estructura

bandeada bastante definida pero de anchos irregulares, varían de finas a gruesas. Las bandas gris oscuras tienen espesores de 0.5 a 2 cm y se componen de pequeños cuarzos, feldespatos y ferro magnesianos. Las bandas rosadas contienen ortosa y cuarzo, son muy irregulares y fáciles de observar los agregados redondeados o lenticulares de ortosa de dimensiones diseminados en la roca. Los gneis afloran en el extremo norte y noroeste de la zona de estudio, entre Mollendo y el Valle del Tambo formando el flanco de la cadena Costanera presente en el borde occidental de la Cordillera Andina. También afloran al norte de la Boca del río Ilo, en la misma orilla del mar y formando una faja angosta que se extiende desde la quebrada Pocoma hasta el límite del cuadrángulo.

Suprayaciendo a las rocas del Complejo Basal de la Costa, afloran pequeños remanentes a la Formación Moquegua (Paleógeno a Neógeno) con espesores de 510 metros. Esta formación ha sido dividida y mapeada en dos miembros (Inferior y Superior), teniendo en cuenta la diferencia de litología y una suave discordancia entre ambas. El Miembro Inferior se encuentra expuesto en ambas laderas del valle de Moquegua, cerca del fundo El Molle y está conformado por areniscas arcósicas a tufáceas, de color gris a marrón claro, que alternan en forma casi regular con areniscas arcillosas y arcillas, grises a rojizas. Las areniscas son de grano grueso a medio y se componen principalmente de feldespato y cuarzo en formas subangulares, con regular cohesión y a veces bastante compacta por una matriz arcillosa. En las áreas inferiores, las areniscas se presentan en bancos de 50 a 100 cm de grosor e intemperizan exfoliándose en láminas concéntricas. En las áreas superiores, las capas son más delgadas (20 a 50 cm) y tienen el predominio de horizontes arcillosos con capas y venillas de yeso. La estratificación tiene un rumbo promedio en dirección noroeste, con buzamiento de 4° a 5° hacia el sureste.

El Miembro Superior tiene una litología areno-conglomerádica que sobreyace con débil discordancia erosional a las capas del miembro inferior, tal como se observa en la parte alta del valle Moquegua y en los cortes a lo largo de las quebradas. Las formaciones Torán y el batolito, reposan directamente sobre el complejo basal. Este miembro es fácilmente distinguible por sus tonalidades claras que contrastan con las rojizas del Moquegua inferior y por lo general, sus capas tienen posición horizontal y en algunos casos con ligera inclinación en dirección suroeste.

Por encima de la formación Moquegua, se encuentra la formación Millo de edad Pliocena, ambas conformadas por conglomerados moderadamente consolidados y compuestos, en proporción variable, de clastos gruesos subredondeados a redondeados (espesores aproximados de 100 m) y areniscas tufáceas. Estudios recientes demuestran que estos conglomerados corresponderían a depósitos aluviales que conforman las evidencias del importante levantamiento que soportó la cordillera Occidental y que quedó registrado con la presencia de depósitos potentes de conglomerados nombrados regionalmente como Formación Millo. Esta unidad aflora únicamente en las planicies costaneras presentes en los valles y quebradas más jóvenes del cuadrángulo de Punta de Bombón.

Según la columna estratigráfica, las rocas más jóvenes pertenecen a los depósitos del Cuaternario y como los más antiguos, a los aluviales compuestos por; conglomerados y gravas inconsolidadas con intercalaciones de bancos y lentes de arena, arcilla y ocasionalmente de tufos volcánicos (Figura 32). Estos depósitos se encuentran sobre las pampas del desierto de Clemesí, en la extensa planicie del curso inferior del río Tambo y sobre el desierto de Pampa Tambo, ubicado a 4 km al noreste de la ciudad de Punta de Bombón. Finalmente, se tiene depósitos fluviales que aflora en el valle del Tambo.

.- Rocas Ígneas Intrusivas: *En el área del cuadrángulo de Punta de Bombón, las rocas intrusivas afloran en la parte media septentrional, principalmente a lo largo del Flanco Andino, con desarrollo al NO-SE; es decir, diagonal a la hoja. Las rocas intrusivas que afloran regionalmente, forman parte del batolito Jurásico con la presencia de emplazamientos de dioritas y grano-dioritas.*

Diorita: *La roca es de color gris oscuro a negro verdoso, holocristalina, con textura granular, de grano medio a grueso, dentro de las cuales se reconocen plagioclasas gris blanquecinas, hornablenda, escasa biotita y ocasionalmente granos de ortosa. Estas afloran en Pampa Pacheco, ubicado a 11 km al Noreste de Cocachacra y en el cerro Pedregal, ubicado al extremo NE de la hoja.*

Granito-Granodiorita: *Se agrupan a estas, rocas intrusivas cuya composición varía entre granito y granodiorita, son de color gris, algo rosada hasta rojiza, holocristalina y de grano grueso a medio. Estas rocas afloran en diferentes localidades del área de Punta de Bombón y Clemesí.*

9.2.2- Geología Local

Para la elaboración del mapa geológico local se ha considerado la recopilación de la información publicada por INGEMMET, mapas geológicos y estudios neotectónicos regionales y locales. Posteriormente, en campo se realizó el reconocimiento y delimitación local de las principales unidades geológicas aflorantes. Con esta información se ha construido la columna cronolitoestratigráfica de la Figura 33, la misma que muestra con mayor detalle las unidades presentes en la zona de estudio. Finalmente, se obtiene el mapa geológico local a escala 1:25000 (Figura 34), además de un perfil (sección A-A') que corta el valle. La información contenida en el mapa geológico ha permitido identificar la presencia de dos unidades litológicas que se detallan a continuación.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Depósitos Fluviales	Qh-fl
			Depósitos Aluviales	Qh-al
			Depósitos Marinos	Qh-m
	NEOGENO	PLIOCENO	Formación Moquegua	Pn-mo
		MIOCENO		
	PALEOGENO			

Figura 33: Columna cronolitoestratigráfica de la ciudad de Punta Bombon

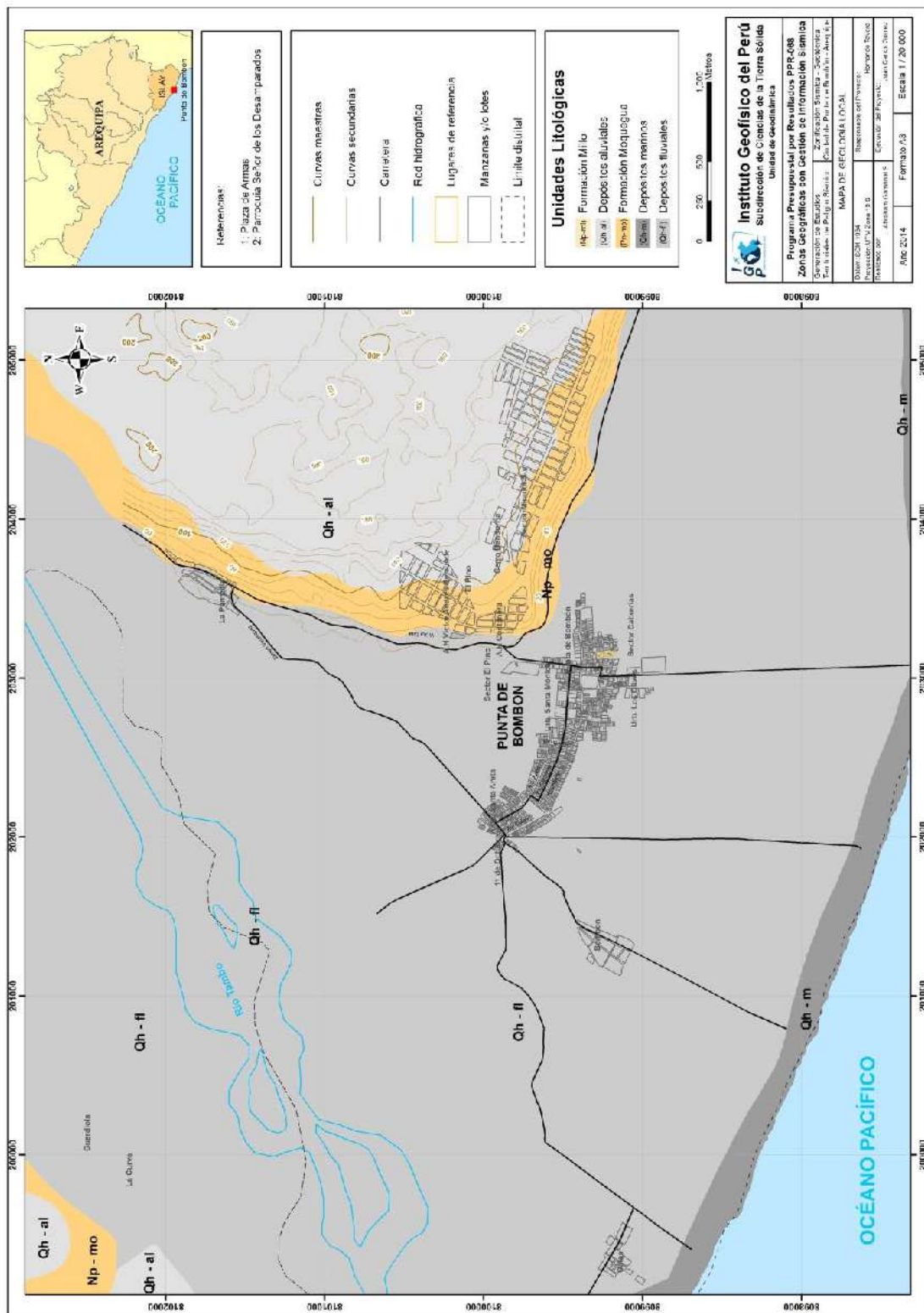


Figura 34: Mapa geológico local de la ciudad de Punta Bombón y alrededores

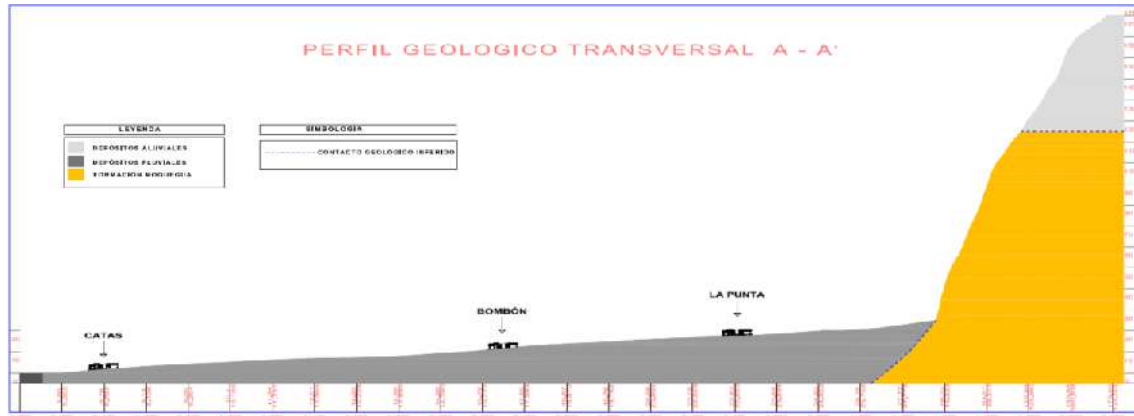


Figura 34: Continuación.../ Perfil geológico que corta el valle de la ciudad de Punta de Bombón

.- **Formación Moquegua:** Constituida por sedimentos de origen continental que afloran al NE del área urbana de la ciudad de Punta de Bombón y a 5 km al noroeste del área urbana de La Curva. Sobre esta formación se asientan los principales depósitos del Cuaternario presentes en la zona de estudio. La Formación Moquegua se originó a fines del Paleógeno e inicios del Neógeno y está conformada principalmente por conglomerados de diversos diámetros, redondeados a subredondeados, con limos y areniscas de color beige, grano fino a medio (Figura 35).



Figura 35: A: muestra la composición litológica de la Fm. Moquegua. B: Rocas de origen continental de tipo conglomerados en una matriz arenosa consolidada. C: Areniscas de color beige de grano medio a fino, muy fracturadas y fácil de erosionar.



Figura 35: Continuación.../ A: muestra la composición litológica de la Fm. Moquegua. B: Rocas de origen continental de tipo conglomerados en una matriz arenosa consolidada. C: Areniscas de color beige de grano medio a fino, muy fracturadas y fácil de erosionar.

.- Depósitos Cuaternarios: Sobre el substrato rocoso de la Formación Moquegua (Holoceno), aparecen depósitos cuaternarios de manera dispersa y con espesores variables, siendo sus características las siguientes:

Depósitos fluviales (Qh-fl): Fueron formados por acumulación de suelos recientes por el río Tambo y quebradas aledañas. Están constituidos por clastos de origen ígneo con formas redondeadas a subredondeadas, siendo su tamaño variable que va desde la arena arcillosa hasta las gravas gruesas y algunos cantos. Estos depósitos fueron transportados por el río en dirección noreste a suroeste, ocupando el lecho fluvial, llanura de inundación y las terrazas fluviales. Este material es explotado en canteras de manera informal como agregados de construcción, principalmente en el cauce del río Tambo a 150 m al NE del Puente Freyre, lo cual modifica el fondo y ancho del cauce. En las márgenes derecha e izquierda del río, se cuenta con una capa de arena limosa de 0.5 metros que viene siendo utilizado como terrenos de cultivos, Figuras 36 y 37.

Depósitos aluviales (Qh-al): Estos depósitos se encuentran suprayaciendo a la Formación Moquegua, presentan diferentes espesores y están constituidos por gravas redondeadas a subredondeadas, de origen ígneo en una matriz arenosa. En algunos sectores, esta matriz se encuentra bien cementada. Sobre estos depósitos se encuentra una capa de 5 cm de arenas de tipo

eólico. Estos depósitos afloran a 600 metros al NE de la ciudad de Punta de Bombón, en el cerro Bandurria donde se localizan los asentamientos humanos El Pino, Costanera Sur y futuras expansiones urbanas. También se encuentran a 5.5 km al noroeste de La Curva, abarcando el 20% del área de estudio, Figuras 38 y 39.



Figura 36: Depósitos fluviales en el cauce del río Tambo. Ambas márgenes han sido reforzadas con bloques de rocas para evitar la erosión.



Figura 37: Obsérvese que la mayor parte de los depósitos fluviales son utilizados como terrenos de cultivo, sector La Pampilla.



Figura 38: La línea amarilla indica el límite de los depósitos aluviales ubicados en el cerro Bandurria y sobre los cuales se encuentran las áreas urbanas de El Pino y Costanera Sur.

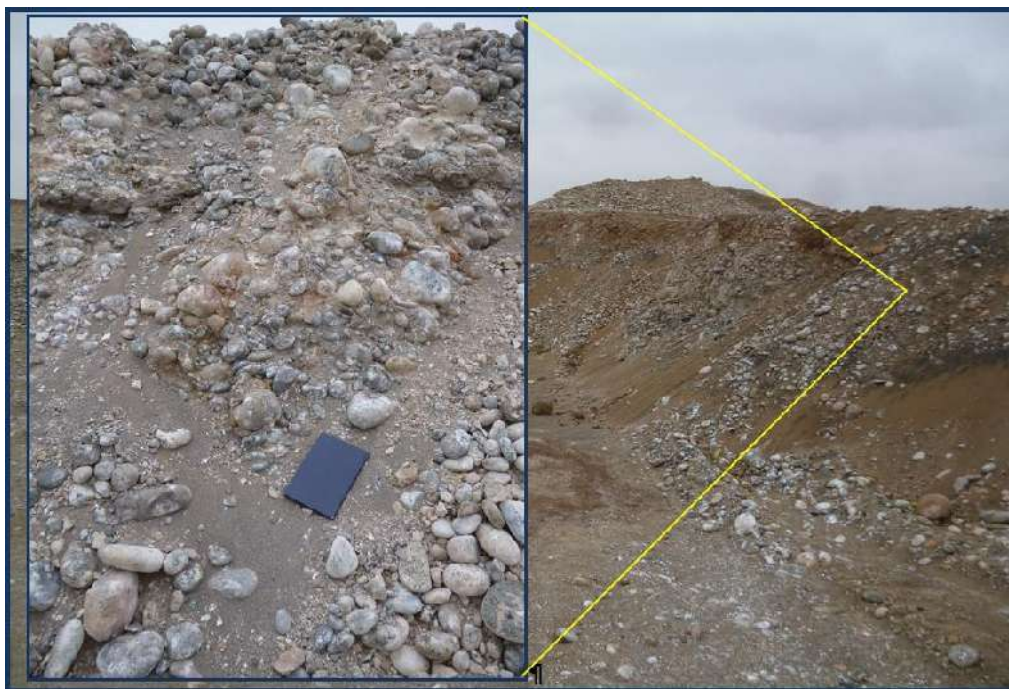


Figura 39: A 4 km en dirección SE de la ciudad de Punta de Bombón se observa la presencia de materiales compuestos por gravas de origen ígneo redondeadas a subredondeadas en una matriz areno limosa bien compacta.

Depósitos marinos (Qh-m): En las playas, estos depósitos de origen marino están conformados de arenas no consolidadas de grano fino a medio, redondeados, con tonalidades que van desde gris claro a oscuro. En la desembocadura del río Tambo, estos mantos alcanzan anchos promedios de 1.7 km, cubriendo así los depósitos fluviales. En la playa La Punta, ubicado al

sur de la ciudad, los mantos van extendiéndose en ancho, llegando hasta la parte inferior de las terrazas aluviales. Estos mantos ocupan el 10% de la superficie del área de estudio, Figura 40 y 41.



Figura 40: En la desembocadura del río Tambo, los depósitos marinos se encuentran cubriendo materiales fluviales.



Figura 41: Obsérvese que sobre los depósitos de arenas de grano fino a medio, se asientan infraestructuras públicas; por lo tanto, están expuestas a eventos naturales como los tsunamis.

9.2.3- Geología Estructural

Regionalmente, la zona costera de la región sur del Perú se caracteriza por presentar los siguientes rasgos estructurales:

.-Depresión tectónica longitudinal; esta unidad estructural intermontañosa se distingue en el área de estudio desde el río Tambo en dirección sur. Los depósitos de la formación Moquegua que rellenan la depresión, no llegan a exceder la muralla frontal de la Cadena costanera. La depresión se ha formado debido a la presencia de la cadena costanera y al desarrollo de fallamientos longitudinales paralelos, todos distribuidos a lo largo de las estribaciones andinas. Este escenario permitió que el bloque occidental descienda con respecto al oriental, originando una depresión alargada entre la cadena costanera y el frente de los Andes.

.- Fallamientos de tipo normal: en el cuadrángulo geológico de Punta de Bombón y Cumesí, se evidencia la presencia de fallas longitudinales y otras perpendiculares a lo largo de la zona de costera siendo las causantes de los fracturamientos en bloques. La mayor parte de estas fallas son consideradas como probables, pues se han anotado en base a evidencias fisiográficas como escarpas bien delineadas. Por su orientación, éstas se agrupan en dos sistemas:

- Fallas de rumbo NE-SW o sistema de fallas transversales: fallas Salinas, Cumesí e Infiernillos.*
- Fallas de rumbo NW-SE o sistema de fallas longitudinales: fallas Yamayo, ubicada al Oeste del río Tambo y otra, en la parte frontal de los cerros Huachirondo.*

9.3.- Geodinámica

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

.- Geodinámica Interna: El territorio peruano está sometido a una constante actividad sísmica, debido a la interacción de las placas Sudamericana y Nazca, escenario considerado como la primera fuente sismogénica en el Perú debido a la frecuencia de sismos y por dar origen a los eventos de mayor magnitud. La segunda fuente, la constituye la zona continental, cuya deformación ha dado origen a la formación de fallas de diversas longitudes con la consecuente ocurrencia de sismos de magnitudes menores (Cahill et al, 1992; Tavera et al, 2001). Históricamente, la ocurrencia de sismos en la zona de estudio, se constituye como el principal detonante de eventos geodinámicos como los movimientos en masa, la caída de rocas y derrumbes.

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

Además, la presencia de “El Niño” ocasiona el incremento de la temperatura en la superficie del mar, provocando lluvias torrenciales con valores que sobrepasan los índices normales de precipitaciones en la costa; mientras que, en la sierra y en especial en el altiplano, las lluvias son escasas, presentándose estadios largos de sequías. Históricamente, las condiciones descritas en la costa centro y norte del territorio peruano son debidas a la presencia de “El Niño” y a otros factores relacionados con la actividad antrópica.

La geodinámica interna y externa presente en la zona de estudio (ver Anexos), es la responsable de modelar la superficie, creando geoformas que han sido objeto de estudio en capítulos anteriores. A continuación, se analiza los procesos dinámicos que se desarrollan en la ciudad de Punta de Bombón.

9.3.1.- Movimientos en Masa

Son movimientos que por efecto de la gravedad, ladera abajo, trasladan laderas abajo, rocas, detritos o tierras (Cruden, 1991). Para proceder a la clasificación de los movimientos en masa en la ciudad de Punta de Bombón, se hace uso de las tablas propuestas por Varnes (1958, 1978) y Hutchinson (1968,

1988). Estas tablas tienen en cuenta el tipo de movimiento y el tipo de material. En cuanto al primero, se considera 5 clases: caídas, volcamientos, deslizamientos, flujos y propagación lateral. Dentro de los materiales se consideran: rocas y suelos, estos últimos subdivididos en detritos y tierras. El trabajo de campo realizado en la ciudad de Punta de Bombón y alrededores, ha permitido identificar procesos de caída de rocas y bloques (tipo de movimiento) y flujos de detritos (tipo de material que transportan), siendo sus características las siguientes:

***.- Derrumbes:** Estos eventos están presentes en las laderas del Cerro Bandurria (pendientes > 30°), ubicado a 350 metros al NE de la ciudad. Los materiales están constituidos por limos, arenas de grano medio y materiales de origen aluvial, producto del fracturamiento intenso y erosión insitu de las rocas de la Formación Moquegua. Los derrumbes se dan ladera abajo, afectando la seguridad física de la población y la carretera "Costanera Norte", que conecta a los distritos de Cocachacra y Ilo (Figuras 42 y 43).*

9.3.2.- Procesos erosivos

Los principales procesos erosivos presentes en la ciudad de Punta de Bombón son:

***.- Erosión marina:** Proceso ocasionado por la acción dinámica de las olas sobre los materiales que conforman el litoral. En la playa La Punta, se observa que las infraestructuras públicas están siendo afectadas por este tipo de evento, siendo necesario proyectar obras de protección. Por ejemplo, a 2 km en dirección SE de la playa, se encuentra un dren que discurre sus aguas hacia el océano y cuando se produce la marea alta, el dren llega a colapsar erosionando y ampliando su cauce principal (Figuras 44 y 45).*

9.3.3.- Peligro de Inundaciones

El río Tambo nace de la unión de los ríos Paltutur en la margen derecha e Ichuña en la margen izquierda, en las cercanías de la localidad de Arata. Aguas abajo recibe a su afluente más importante, el río Coralaque. El río tiene una longitud de 276 km. En el valle del mismo nombre, el caudal promedio del río es de 39.6 m³/seg. (INDECI, 2001).



Figura 42: Obsérvese como los derrumbes afectan la carretera costanera que une Cocachacra e Ilo.



Figura 43: En La Pampilla ocurren derrumbes que afectan la seguridad física de la población.



Figura 44: Observe como las olas alcanzan a la infraestructura pública, sobre todo en épocas de marea alta.



Figura 45: Obsérvese el fuerte oleaje en la playa La Punta. La continua erosión amplifica su cauce.

.- Zonas inundables: El río Tambo limita a los distritos de Punta de Bombón y Deán Valdivia, y las causas de sus desbordes son: Inundaciones que se producen debido a la saturación de su cauce principal, registrado en un determinado lugar

y en épocas de lluvias intensas y prolongadas. Otra de las causas principales para el desborde, es la acumulación de sedimentos a lo largo del cauce del río, lo que trae como consecuencia que el río tenga poca profundidad y este, acompañado de un aumento de caudal que rebase su cauce en zonas aledañas al mismo. Por último y no menos importante, se tienen las actividades humanas, como por ejemplo, la acumulación de residuos sólidos o desmontes vertidos en el río, lo que generan que las aguas inunden zonas de baja pendiente. Todos estos escenarios perjudican a las poblaciones y zonas agrícolas.

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 Punta de Bombón se recolectó información según las siguientes técnicas:

.- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Punta de Bombón se construyeron 8 calicatas (Tabla 4 y Figura 46), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.2 metros y la mínima de 1.2 metros (ver Anexos). La profundidad varía porque en algunos suelos se encontró materiales muy sueltos y difíciles de conservar la uniformidad.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
CPB - 01	203085	8099637	15	3.10
CPB - 02	202772	8099433	14	1.50
CPB - 03	202494	8099778	20	3.20
CPB - 04	202204	8099517	8	2.40
CPB - 05	201238	8099151	12	2.60
CPB - 06	199253	8099058	7	1.20
CPB - 07	203894	8099691	102	3.10
CPB - 08	203691	8101900	23	2.30

.- Densidad de suelo in situ (Norma ASTM D1556): En cada punto de exploración se realizó el ensayo de densidad de campo haciendo uso del método del cono a fin de conocer la densidad y el contenido de humedad del suelo en condiciones naturales. Esta información es necesaria para la preparación de las muestras de suelo al momento de realizar los ensayos de corte directo. En la Tabla 5 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación.

.- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 8 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 6), siendo en este caso, la máxima

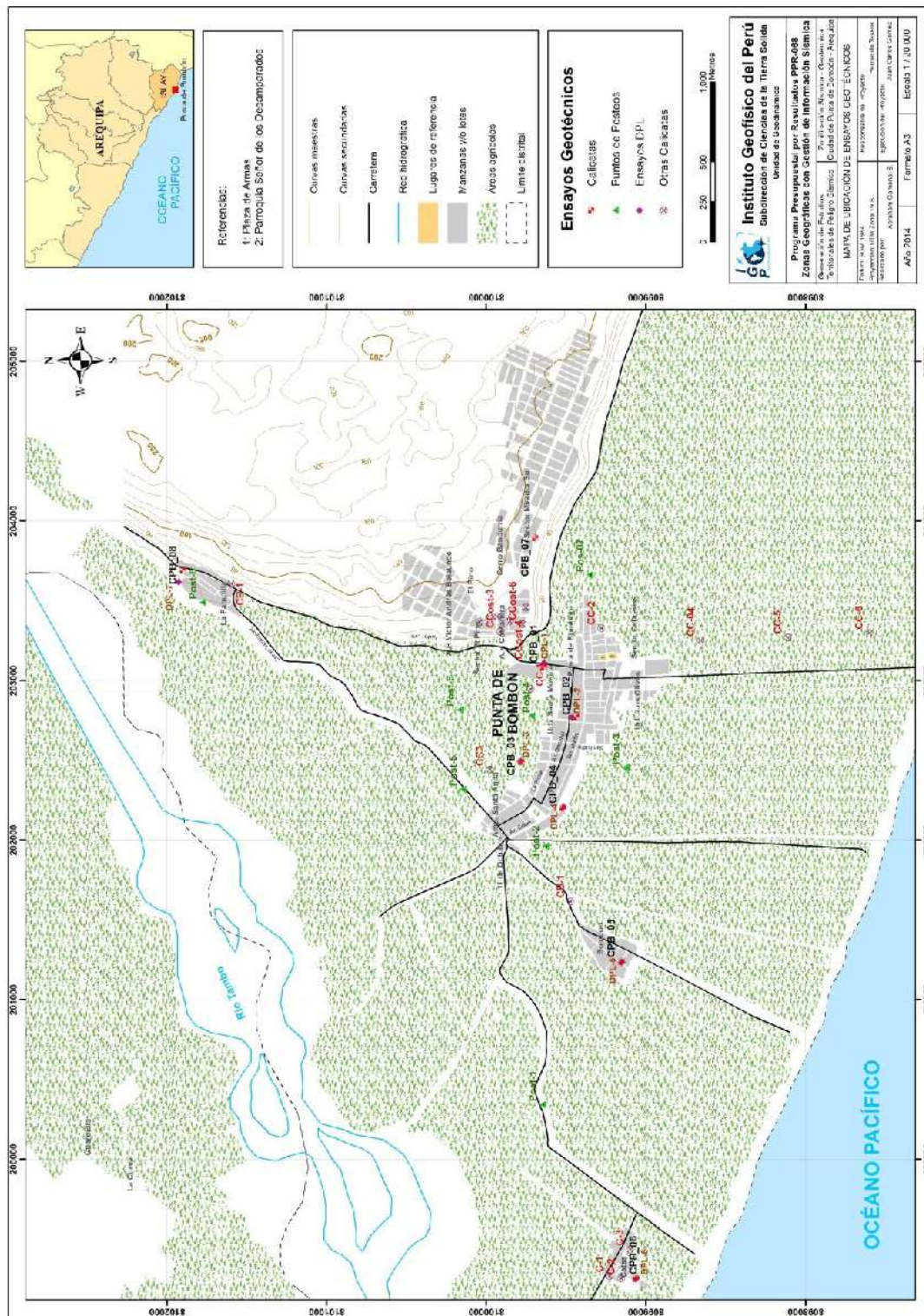


Figura 46: Mapa de ubicación de calicatas y posteos de suelos en la ciudad de Punta de Bombón

profundidad de observación de 4.20 metros y la mínima de 1 metro (ver Anexos), debido principalmente a que los suelos están constituidos por arenas y limos. Estas exploraciones fueron distribuidas entre las calicatas, en lugares donde no existe información geotécnica a fin de tener mejor caracterización de los suelos en la ciudad de Punta de Bombón.

Tabla 5: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Punta de Bombón

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDAD (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
CPB - 01	DC-CPB - 01	23.10	1.21	1.18
CPB - 02	DC-CPB - 02	3.20	5.30	5.30
CPB - 03	DC-CPB - 03	2.50	1.57	1.48
CPB - 04	DC-CPB - 04	1.60	1.50	1.40
CPB - 05	DC-CPB - 05	2.20	1.67	1.50
CPB - 06	DC-CPB - 06	0.50	2.91	2.40
CPB - 07	DC-CPB - 07	3.00	2.93	2.88
CPB - 08	DC-CPB - 08	1.40	5.30	5.30

Tabla 6: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en la ciudad de Punta de Bombón

POSTEOS	UTM ESTE(m)	UTM NORTE(m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
Post - 01	200342	8099645	15	1.30
Post - 02	201963	8099627	32	1.00
Post - 03	202454	8099124	7	1.50
Post - 04	202778	8099715	11	4.20
Post - 05	202319	8100147	20	2.10
Post - 06	202817	8100164	29	2.00
Post - 07	203662	8099349	3	2.30
Post - 08	203489	8101776	17	1.70

.- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 7 puntos dentro de la ciudad de Punta de Bombón (Tabla 7). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 3.90 metros y mínima de 0.28 metros debido a que los suelos están conformados por arenas gruesas a finas y presencia de limos con ángulos de fricción promedio de 27.6° a 39.7°, característico de suelos sueltos a semicompactados que indican no presentar resistencia al corte (ver Anexos).

.- **Ensayo de corte directo** (Norma ASTM D3080): Para conocer la resistencia de los suelos al corte, las muestras de suelo recolectadas en campo se enviaron al laboratorio geotécnico de la Universidad Agraria La Molina. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 8. En general, los resultados indican que los suelos de la ciudad de Punta de Bombón presentan cohesión baja; es decir, que tiene consistencia muy blanda a blanda; mientras que, los ángulos de fricción interna superan los 29° , propios de suelos compuestos por arenas sueltas bien graduadas a mal gradadas.

Tabla 7: 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)	PROFUNDIDAD (m)
DPL-01	203112	8099636	20	2.90
DPL-02	202739	8099465	17	0.28
DPL-03	202493	8099782	20	0.99
DPL-04	202208	8099515	23	3.90
DPL-05	201234	8099150	12	1.30
DPL-06	199252	8099063	7	1.90
DPL-07	203618	8101920	24	2.79

Tabla 8: Valores obtenidos para el ensayo de corte directo en la ciudad de Punta Bombón

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo ($^\circ$)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m^2)	Densidad natural (Tn/cm^3)
CPB - 01	30.40	0.10	--
CPB - 02	29.80	0.20	--
CPB - 03	30.20	0.10	--
CPB - 04	29.80	0.10	--
CPB - 05	31.40	0.10	--
CPB - 06	31.00	0.10	--
CPB - 07	37.60	0.10	1.95
CPB - 08	31.80	0.20	--

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como “*capacidad de carga admisible*”. De los ensayos de corte directo se hace uso de los datos del ángulo de fricción y de cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3

definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Punta de Bombón, los valores de capacidad de carga fueron calculados para una profundidad de cimentación de 1.2 metros y ancho mínimo de cimentación de 1 metro (Tabla 9). La clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 10 y los resultados de muestran en la Figura 47.

Tabla 9: Capacidad de carga admisible en los suelos de la ciudad de Punta de Bombón.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m^2)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm^2)
CPB - 01	62.82	2.09
CPB - 02	57.19	1.91
CPB - 03	60.80	2.03
CPB - 04	57.19	1.91
CPB - 05	72.02	2.40
CPB - 06	42.15	1.41
CPB - 07	188.95	4.72
CPB - 08	76.01	2.53

Tabla 10: Rangos establecidos para la capacidad portante en la ciudad de Punta de Bombón

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm^2)	DENOMINACION	Características
< 1.0	MUY BAJA	
1.0 - 2.0	BAJA	Suelos sueltos
2.0 - 3.0	MEDIA	Suelos moderadamente compactos
> 3.0	ALTA	Suelos compactos

Según estos resultados, la capacidad portante de los suelos es:

.- Capacidad portante baja: corresponde al 80% de la superficie del área de estudio y ello considera todo el casco urbano de la ciudad de Punta de Bombón.

.- Capacidad portante media: corresponde al 17% de la superficie del área de estudio. Abarca a las áreas urbanas de La Pampilla y Urb. Santa Mónica.

.- Capacidad portante alta: corresponde al 2% de la superficie del área de estudio. Abarca al sector del Mirador Sur ubicado en el cerro Bandurria.

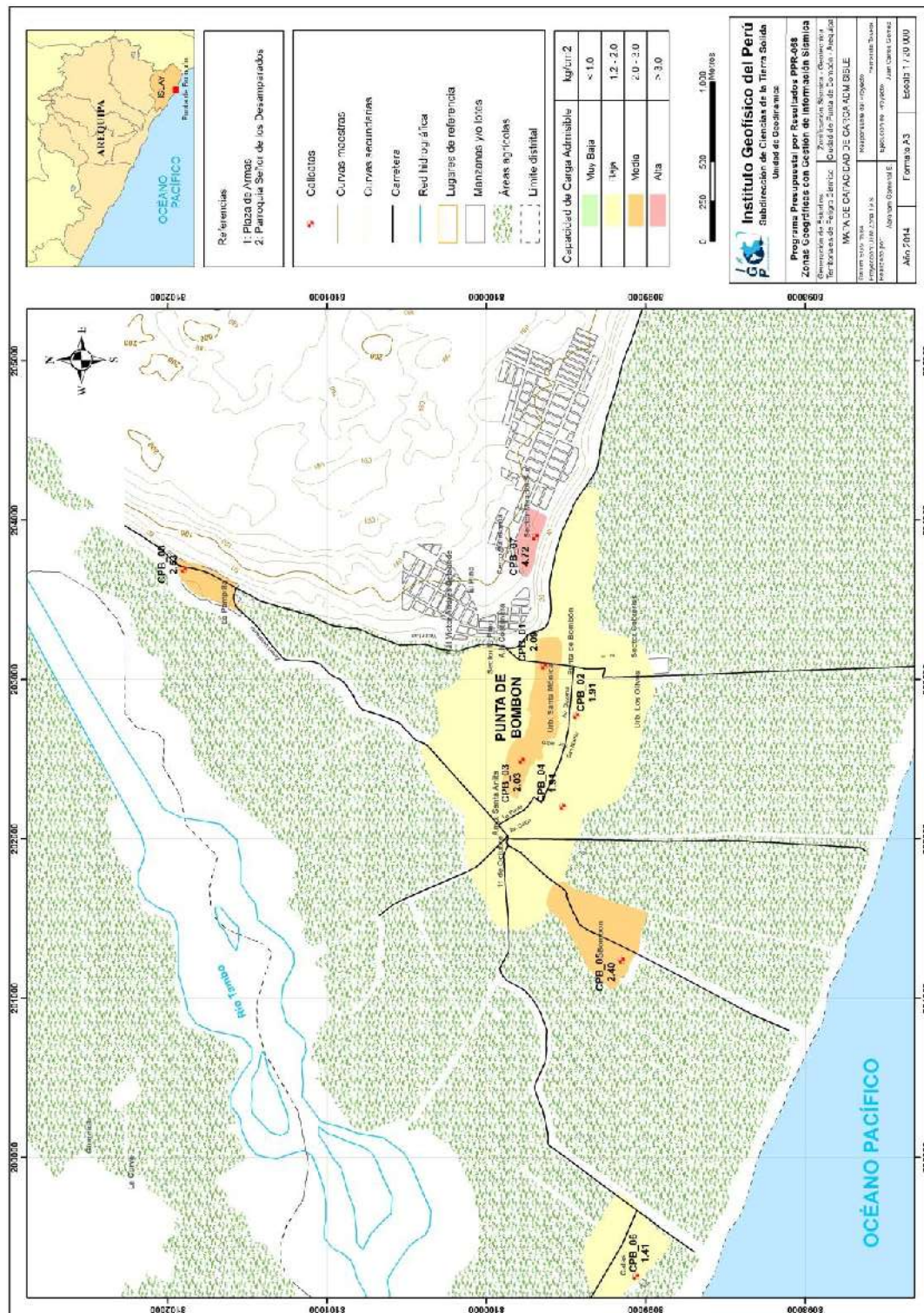


Figura 47: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Punta de Bombón

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Puna de Bombón. Se ha identificado la existencia de 4 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 48 y Tabla 11):

***.- Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal gradadas. Su contenido de humedad es de 2.50 a 6.50%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es baja. Son suelos sueltos a medianamente compactos y no presentan plasticidad. Su capacidad de carga admisible es de 1.91 a 2.03 Kg/cm². Estos suelos están presentes en el 23% de la superficie del área de estudio, principalmente en los sectores de La Pampilla, Catas y toda el área urbana Punta de Bombón. Estos suelos también están presentes en el AAHH Costanera, ubicado en el Cerro Bandurria.*

***.- Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas. Su contenido de humedad es de 27.43% a 32.75%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es alta. Son suelos de baja compacidad y no presentan plasticidad. Estos suelos representan el 70% de la superficie del área de estudio y están presentes en el sector Cabrerías y parte del AAHH Costanera en el cerro Bandurria.*

***.- Suelos tipo SW:** Están conformados por arenas bien gradadas. Su contenido de humedad es de 2.5% a 7.0%, por lo cual se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos sueltos a medianamente compactos y no presentan plasticidad. Sus valores de capacidad de carga admisible de 1.41 a 2.53 Kg/cm². Estos suelos están presentes en el 3 % del área de estudio y ha sido identificado en toda el área urbana de Punta de Bombón y La Pampilla.*

***.- Suelos tipo GM:** Están conformados por gravas arenosas limosas Su contenido de humedad es de 2.50%, Se les considera como suelos semicompactos y no presenta plasticidad (debido a la escasa presencia de material fino). Su capacidad de carga admisible es de 4.72 Kg/cm². Estos suelos ocupan el 3 % de la superficie de la ciudad de Punta de Bombón. Estos suelos*

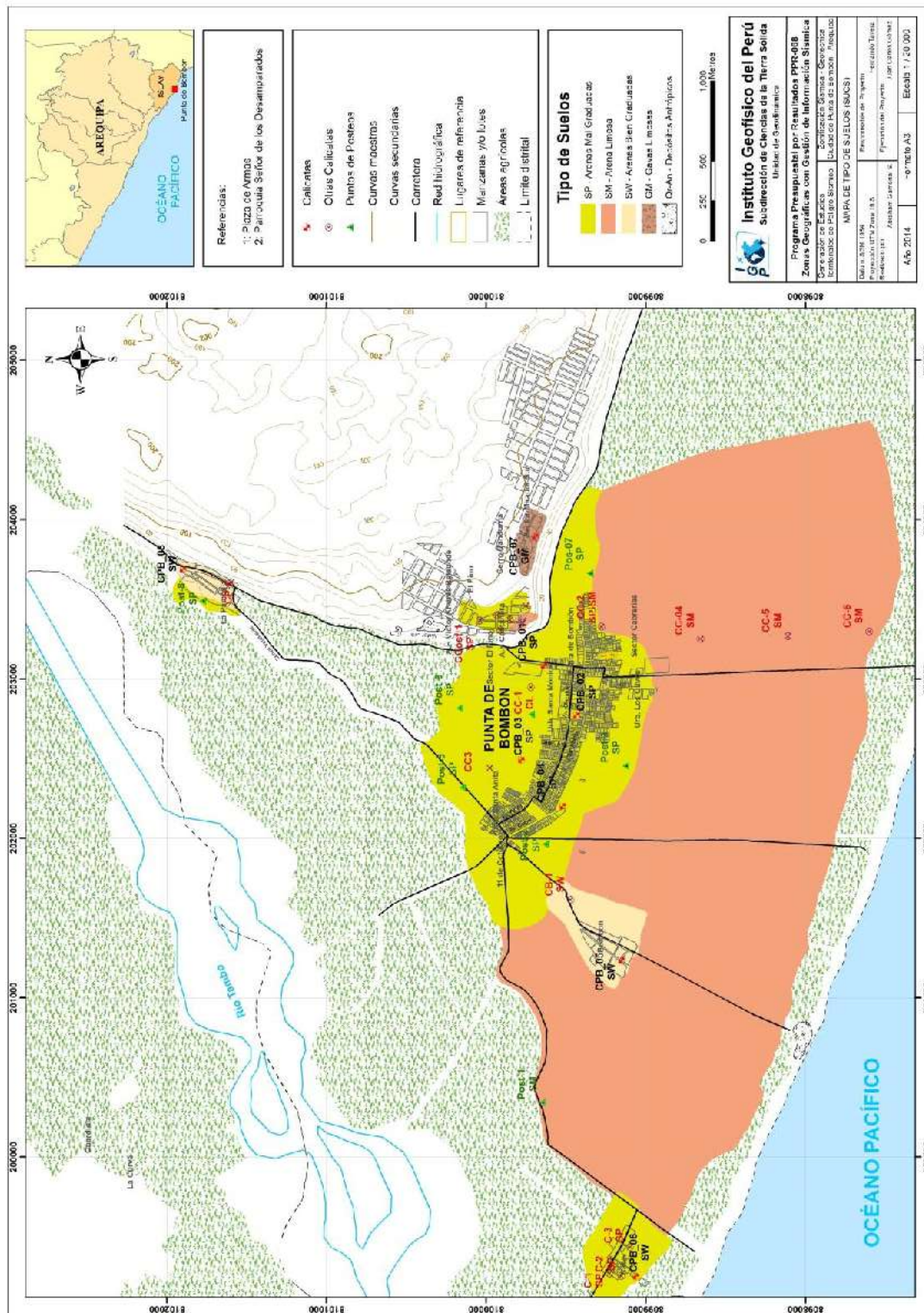


Figura 48: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Punta de Bombón

pertenecen a la Formación Moquegua y han sido identificados en el sector Mirador Sur, en el cerro Bandurria.

.- Materiales Antrópicos (Qr-an): Son materiales no consolidados, mal seleccionados y generados por la actividad humana. Estos depósitos se encuentran en las playas de Catas, Bombón y en mayor proporción en la playa La Punta. Están compuestos principalmente de materiales de escombros de construcción. Sobre estos depósitos están asentadas infraestructura física como el mirador, piscina, baños, restaurantes y zonas de parqueo. También se encuentran rellenos sanitarios ubicados a 1.1 km al NE del área urbana de La Punta, en el cerro Bandurria. Estos depósitos abarcan el 1% de la superficie del área de estudio.

Tabla 11: Valores obtenidos en la clasificación de suelos en la ciudad de Punta de Bombón.

CALICATA	PROF (m)	NF (m)	GRAVAS (>4.76)	ARENAS (>0.074mm, <4.76mm)	FINOS (% (<0.074)	LÍMITE LÍQUIDO (%)	LÍMITE PLÁSTICO (%)	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	SUCS	DENOMINACIÓN
CPB - 01	3.10	NP	6	93	1	NT	NP	3.90	SP	Arena mal gradada
CPB - 02	1.50	NP	5	92	3	NT	NP	2.50	SP	Arena mal gradada
CPB - 03	2.50	NP	6	92	2	NT	NP	4.20	SP	Arena mal gradada
CPB - 04	1.60	NP	4	95	1	NT	NP	6.50	SP	Arena mal gradada
CPB - 05	2.20	2.60	15	84	1	NT	NP	7.20	SW	Arena bien gradada
CPB - 06	0.50	0.80	10	89	1	NT	NP	7.90	SW	Arena bien gradada
CPB - 07	3.00	NP	75	15	10	NT	NP	2.50	GM	Gravas arenosa, limosa
CPB - 08	1.40	NP	18	76	6	NT	NP	2.50	SW	Arena bien gradada

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 Punta de Bombón.

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

Para la aplicación de esta técnica se procedió, sobre el mapa catastral de la ciudad de Punta de Bombón, 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 49 se muestra la distribución espacial de los 173 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 50 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto PB-150. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 15 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, la frecuencia predominante de 1.2 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que a la frecuencia de 1.2 Hz, la energía se irradia principalmente en dirección EO. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

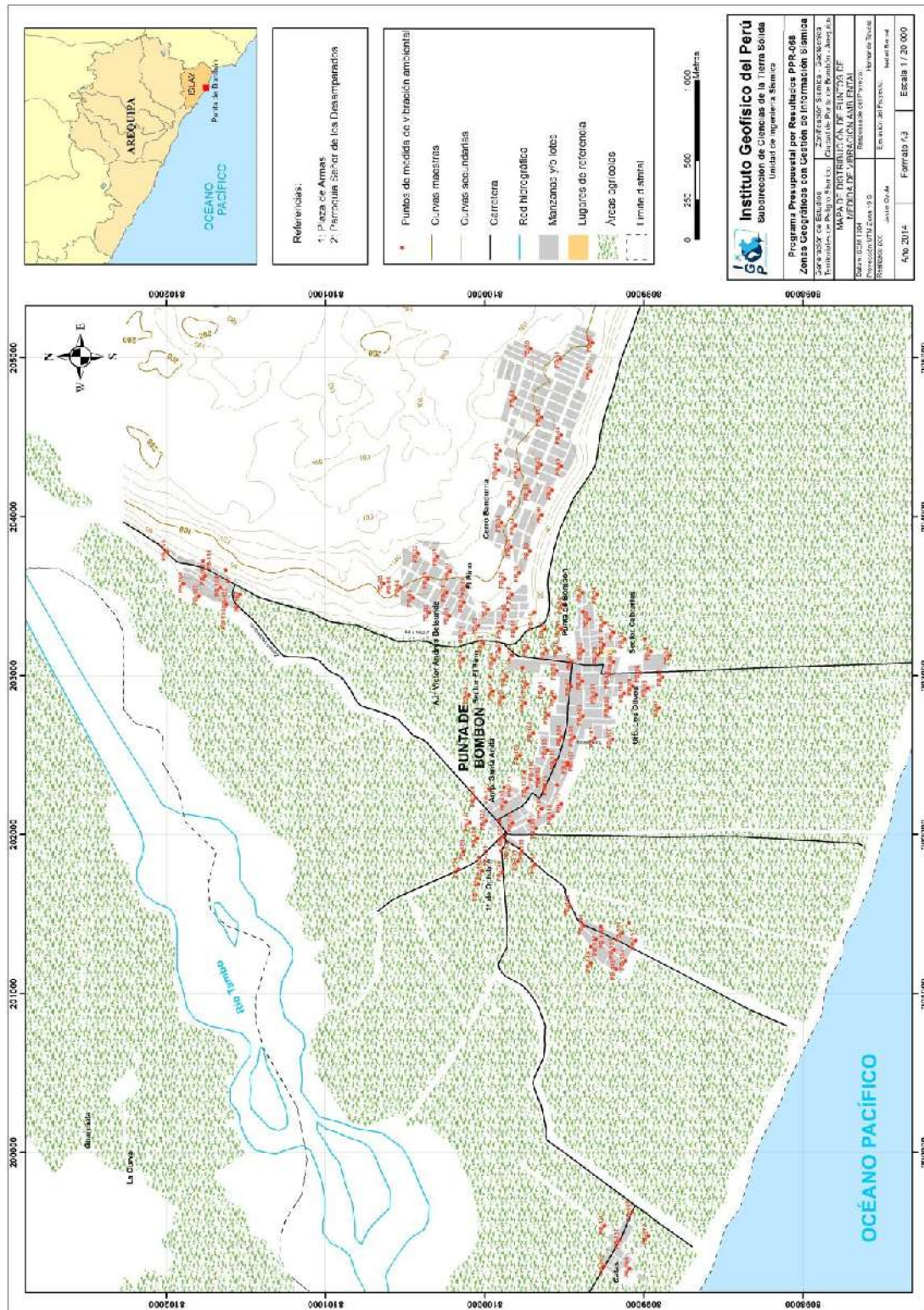


Figura 49: Mapa de la ciudad de Punta de Bombón y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

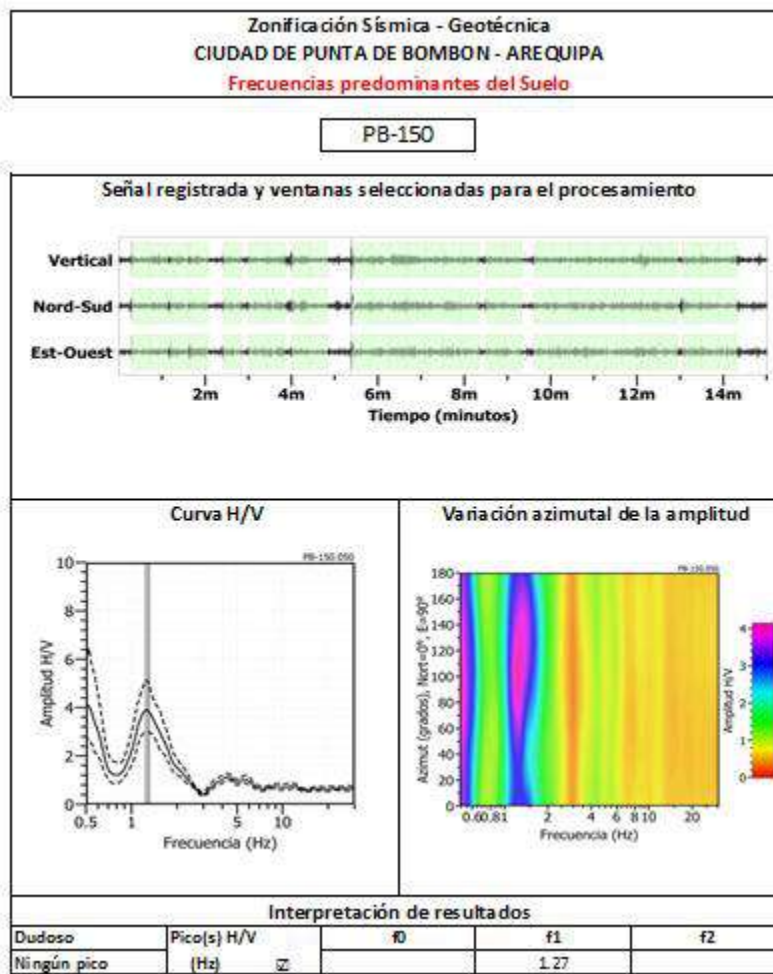


Figura 50: Ejemplo de la ficha H/V para el punto PB-150 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

.- 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 zonas con valores similares para las frecuencias, evidenciando un comportamiento dinámico diferente entre dichas zonas.

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

La información obtenida de las razones espectrales H/V, permite considerar para su análisis dos rangos de frecuencia: **F₀** ($F < 1.0$ Hz) y **F₁** ($F > 1.0$ Hz), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Punta de Bombón.

.- Frecuencias predominantes F₀: Según la Figura 51, estas frecuencias están presentes en el 90% de la superficie que conforma el área de estudio. Los valores mayores a 0.8 Hz están presentes hacia su extremo norte; mientras que, hacia el sur y sobre el abanico aluvial los valores disminuyen hasta valores de 0.6 Hz, coherente con la morfología de la zona. En la Figura 52, se muestran ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos PB-07 (área céntrica), PB-09 y PB-11 en el extremo NE del área de estudio. Las frecuencias características son de 0.6, 0.8 y 0.9 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 3 veces. Además de estos picos de frecuencia, se observa la presencia de otro a las frecuencias de 2.3 a 2.9 Hz con amplificaciones de hasta 2.5 veces.

.- Frecuencias predominantes F₁: La Figura 53 muestra que este rango de frecuencias se distribuye de manera sectorizada sobre la parte central del valle y en el área céntrica de la ciudad de Punta de Bombón. Hacia la Urb. San Mónica las frecuencias predominantes varían entre 2.0 a 3.0 Hz. En áreas ubicadas a mayor altura, AH Víctor Andrés Belaunde y La Costanera, los valores de frecuencias predominantes están entre 3.0 y 4.0 Hz. En el sector del Mirador Sur, este rango de frecuencias presenta amplificaciones mínimas.

En la Figura 54, se muestran ejemplos de razones espectrales característicos. Para el área ubicada en el sector central del valle, las razones espectrales de los puntos PB-112, PB-120, PB-143, PB-146 y PB-148 presentan frecuencias que fluctúan entre 1.2 a 1.6 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 5-7 veces. Un segundo pico de frecuencia a 5.0 Hz presenta menor amplitud y podría estar relacionado con la presencia de capas muy superficiales. Las razones espectrales obtenidas para los puntos PB-60, PB-83 y PB-87 ubicados en las Urb. Santa Mónica y Punta de Bombón (área media entre el valle y las terrazas más elevadas), presentan picos de frecuencias a 2.2, 2.6 y 2.0 Hz con amplificaciones relativas de 6.8, 4.5 y 3.6 veces respectivamente.

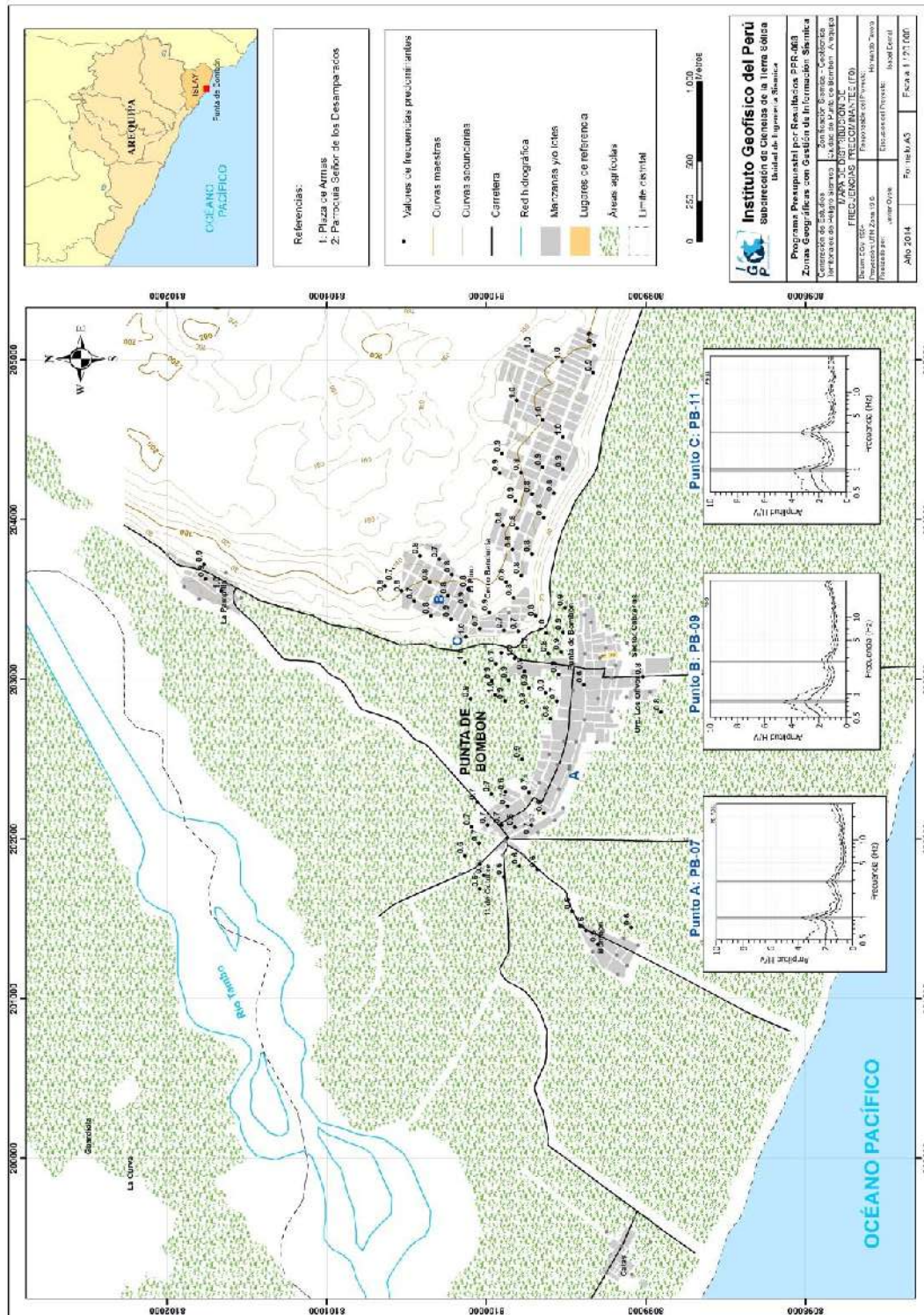
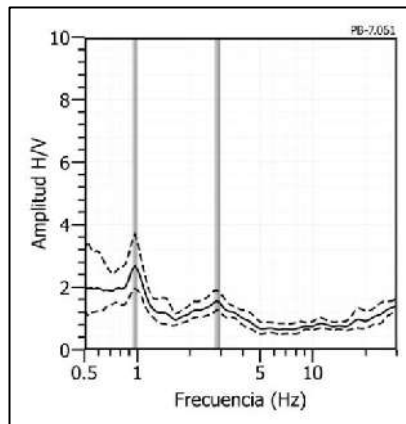
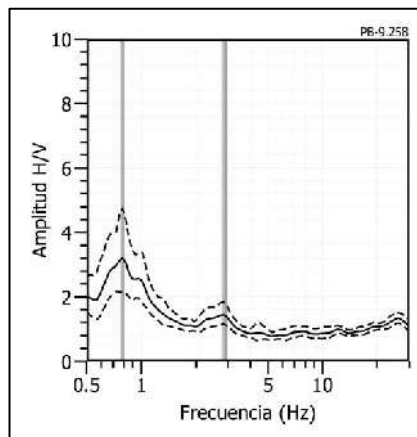


Figura 51: Mapa de la ciudad de Punta de Bombón y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 . Los gráficos de razones espectrales corresponden a puntos representativos.

PB - 07



PB - 09



PB - 11

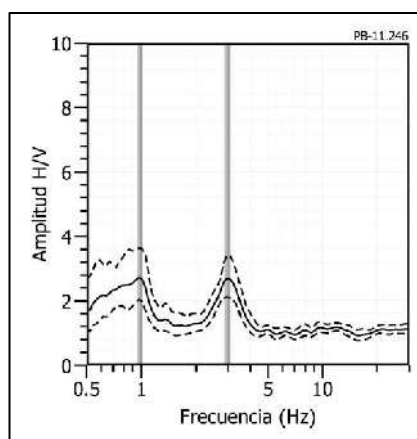


Figura 52: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 1.0$ Hz): puntos PB-07, PB-09 y PB-11, ubicados el primero, en el área céntrica de la ciudad y los dos restantes en el extremo NE del área de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

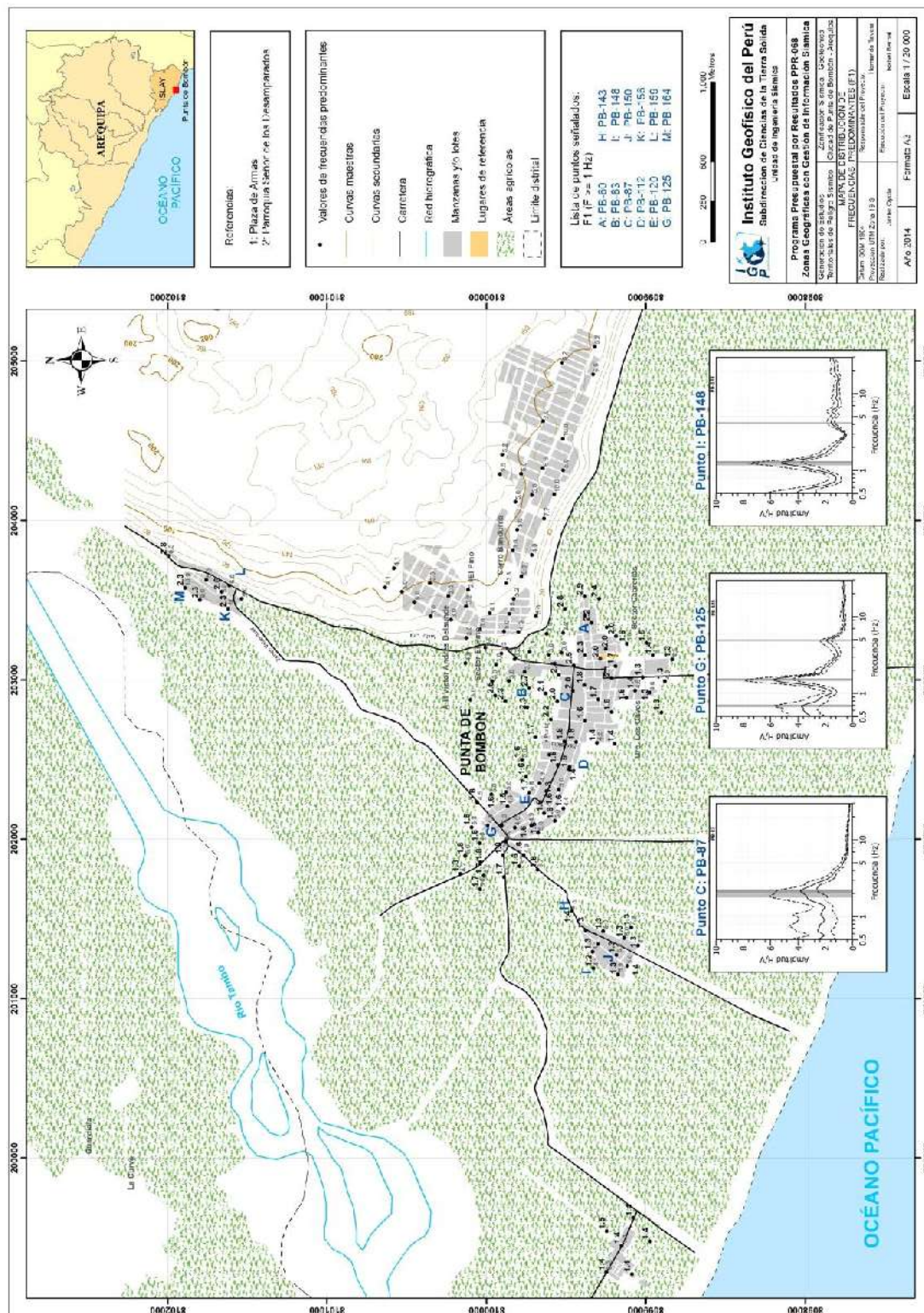
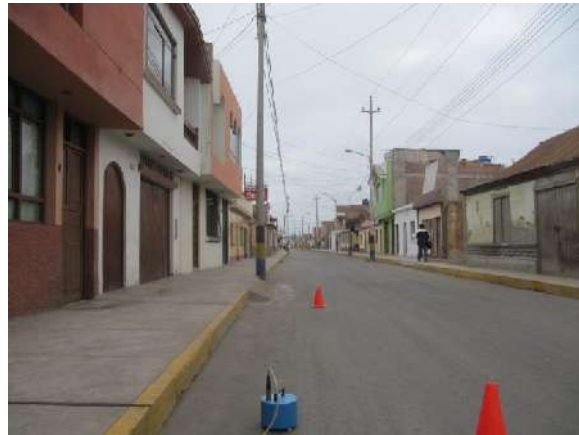
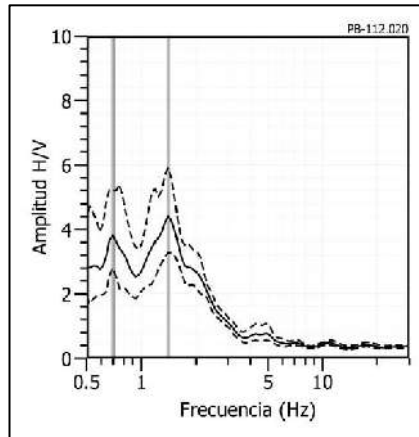
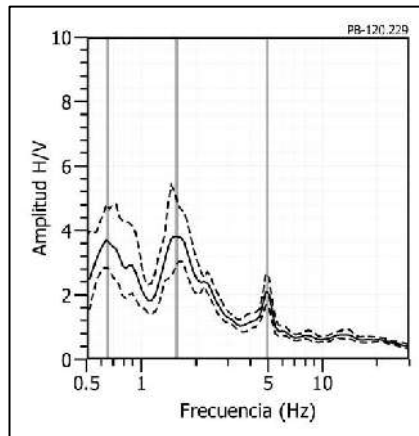


Figura 53: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes $F1(>1.0\text{Hz})$.

PB - 112



PB - 120



PB - 125

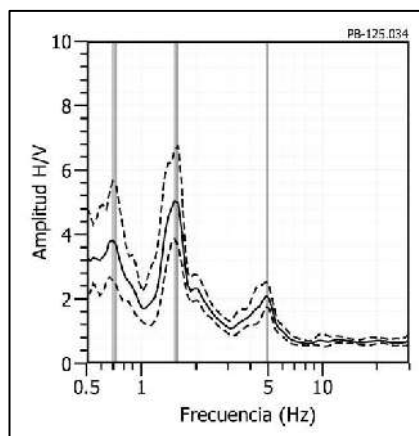
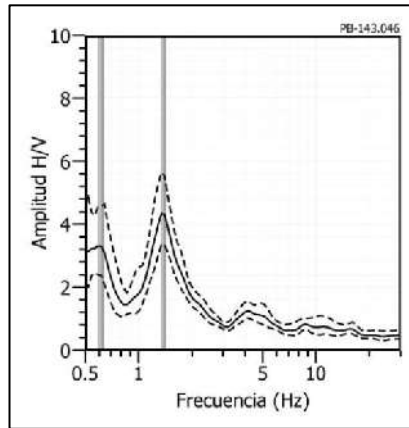
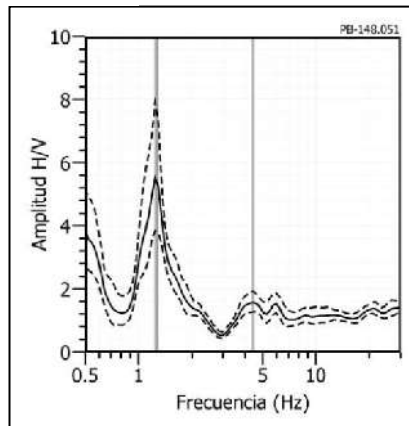


Figura 54: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1. Puntos PB-112, PB-120 y PB-125 ubicados en el sector central del valle de Punta de Bombón. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras en gris definen las frecuencias predominantes.

PB - 143



PB - 148



PB - 150

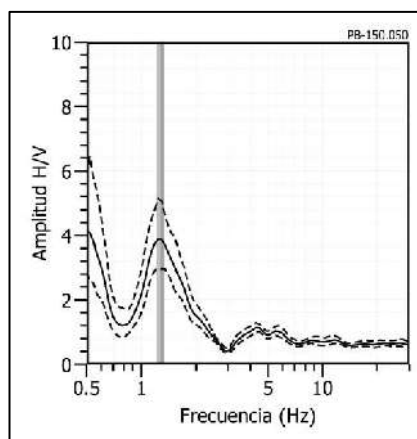
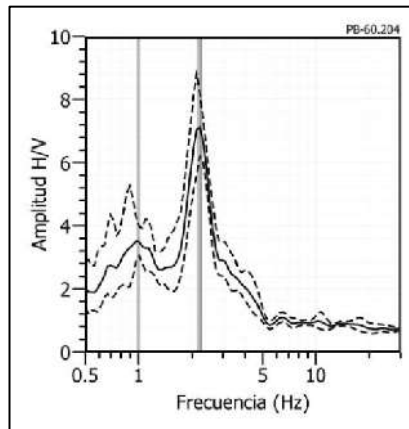
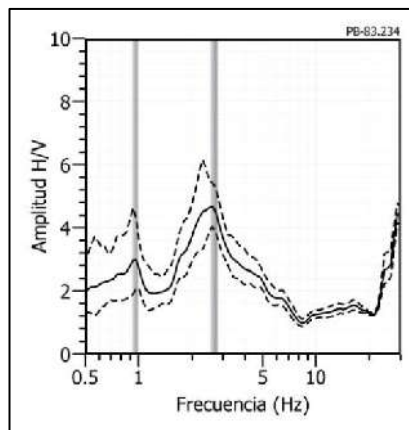


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 para los puntos PB-143, PB-148 y PB-150 ubicados en el sector central del valle y sobre la ciudad de Punta de Bombón. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras en gris define las frecuencias predominantes.

PB - 60



PB - 83



PB - 87

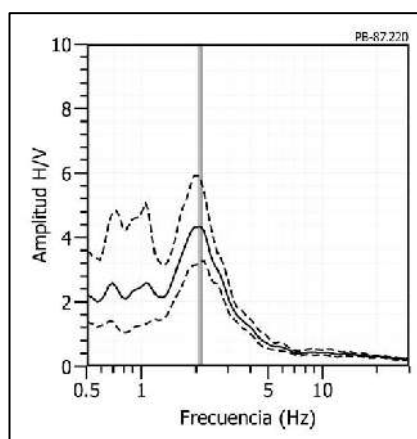
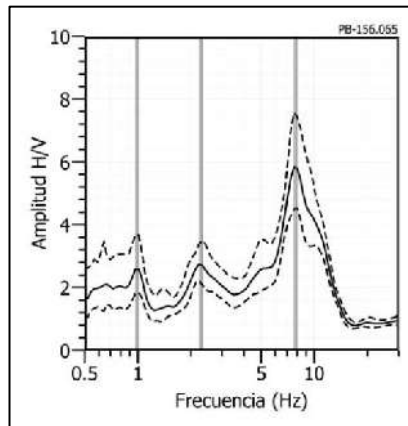
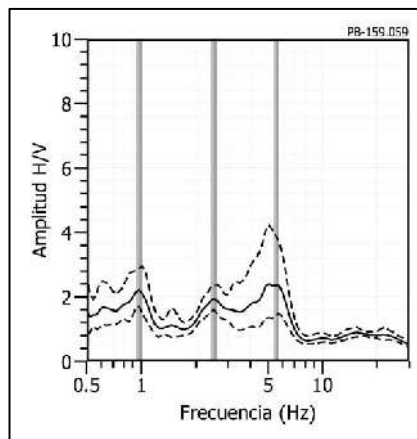


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 para los puntos PB-60, PB-83 y PB-87 ubicados en las urbanizaciones de Santa Mónica y Punta de Bombón. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras en gris definen las frecuencias predominantes.

PB - 156



PB - 159



PB - 164

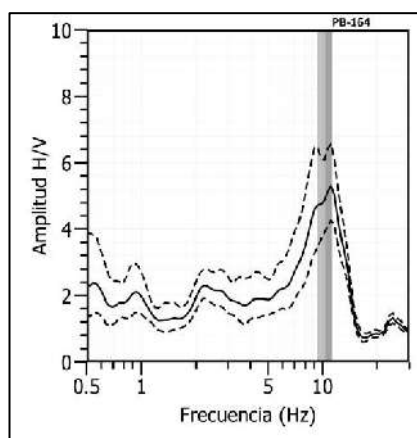


Figura 54: ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 para los puntos PB-156, PB-159 y PB-164 ubicados en el sector norte, La Pampilla. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras en gris definen las frecuencias predominantes.

Para el extremo norte del área de estudio, sobre La Pampilla se presenta las razones espectrales para los puntos PB-156, PB-159 y PB-165 con frecuencias predominantes de 7.8, 5.5 y 10 Hz, todos con amplificaciones relativas máximas de 6.0, 2.4 y 4.9 veces respectivamente. Asimismo, se observa la presencia de un segundo pico a la frecuencia de 1.0 y 2.0 Hz con amplificaciones mínimas.

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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

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

En la Figura 55, se presenta el mapa de la ciudad de Punta de Bombón con la distribución espacial de 9 líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-PB, ..., LS09-PB y de las cuales, 7 tienen un espaciamiento entre geófonos de 4 metros y longitud de 92 metros, y 2 con espaciamiento de 3 metros y 69 metros de longitud. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se considera la clasificación, que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte (V_s):

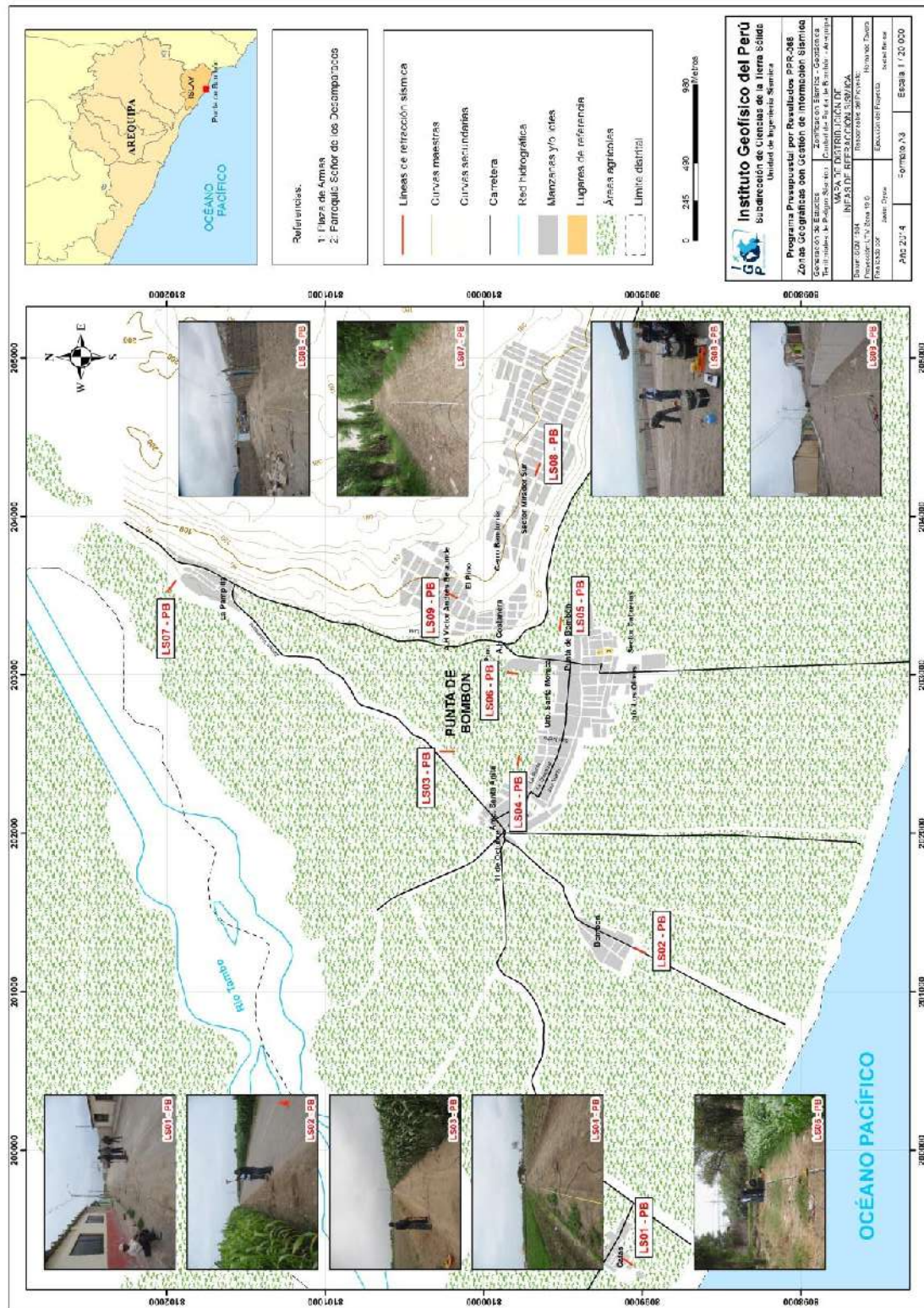


Figura 55: Mapa de la ciudad de Punta de Bombón y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LS01-PB,..., LS09-PB.

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

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 Punta de Bombón (Figura 56).

Línea LS01- PB: Sondaje realizado en la localidad de Catas, donde el perfil sísmico obtenido muestra valores de velocidad de la onda S (V_s) confiables hasta una profundidad de 29 metros. Se identifica la presencia de 2 capas, la primera con 13 metros de espesor y velocidades V_s de 176 m/s, que estratigráficamente corresponde a suelos blandos. La segunda capa con 14 metros de espesor y velocidades V_s de 287 m/s correspondiente a suelos duros. La superficie de contacto con el semi-espacio alcanza velocidades de hasta 372 m/s corresponde a suelos duros.

Línea LS02- PB: Sondaje realizado en el extremo sur de la ciudad de Punta de Bombón y donde el perfil sísmico obtenido muestra valores de velocidad S (V_s) confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se identifica la presencia de una capa de 11 metros de espesor y velocidades V_s de 183 m/s, que estratigráficamente corresponden a suelos blandos. El semi-espacio, alcanza velocidades mayores a 322 m/s correspondiente a suelos duros.

Línea LS03-PB: Sondaje realizado en el extremo norte de la ciudad y sobre un pasaje que cruza la carretera Zenen Velázquez. El perfil sísmico muestra valores de velocidad de la onda S (V_s) confiables hasta una profundidad de 26 metros. Se identifica la presencia de 2 capas bien definidas, la primera con 10 metros de espesor y velocidades V_s de 169 m/s, que estratigráficamente corresponde a suelos blandos. La segunda con espesor de 5 metros y velocidades V_s de 275 m/s, que sugiere la presencia de suelos duros. El semi-espacio alcanza velocidades mayores a 384 m/s correspondiente a suelos duros.

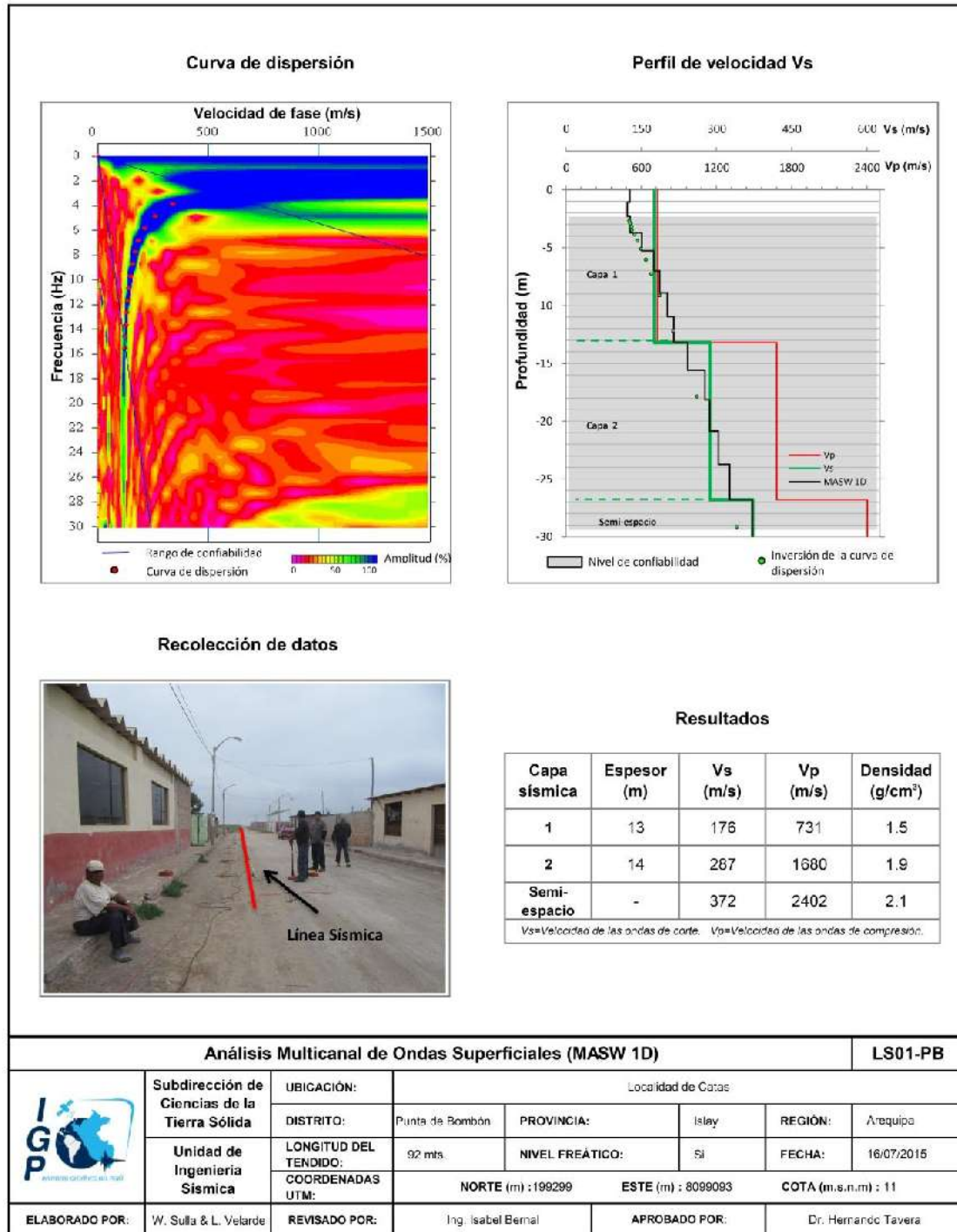


Figura 56: Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS01-PB.

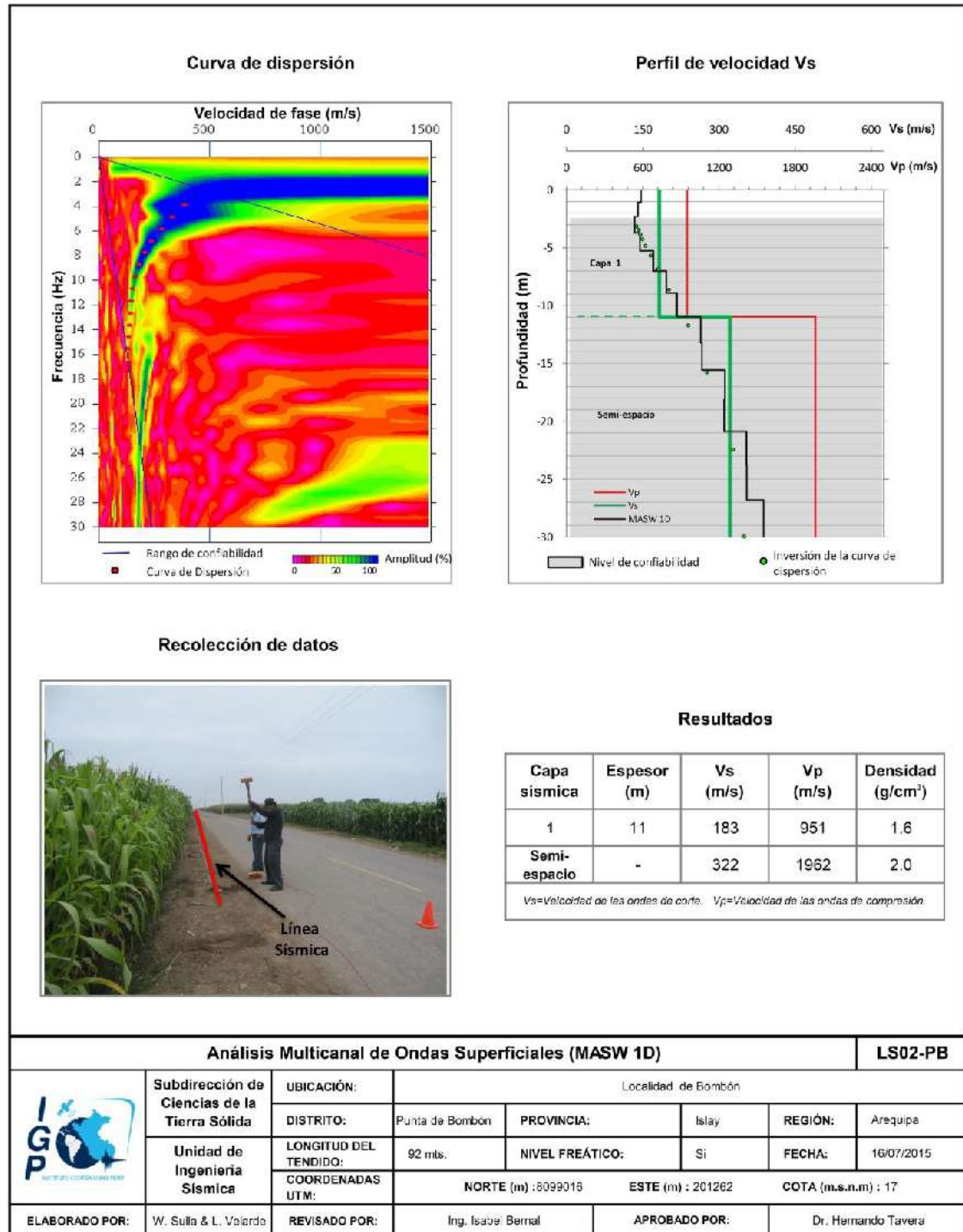


Figura 56: Continuación... / Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS02-PB.

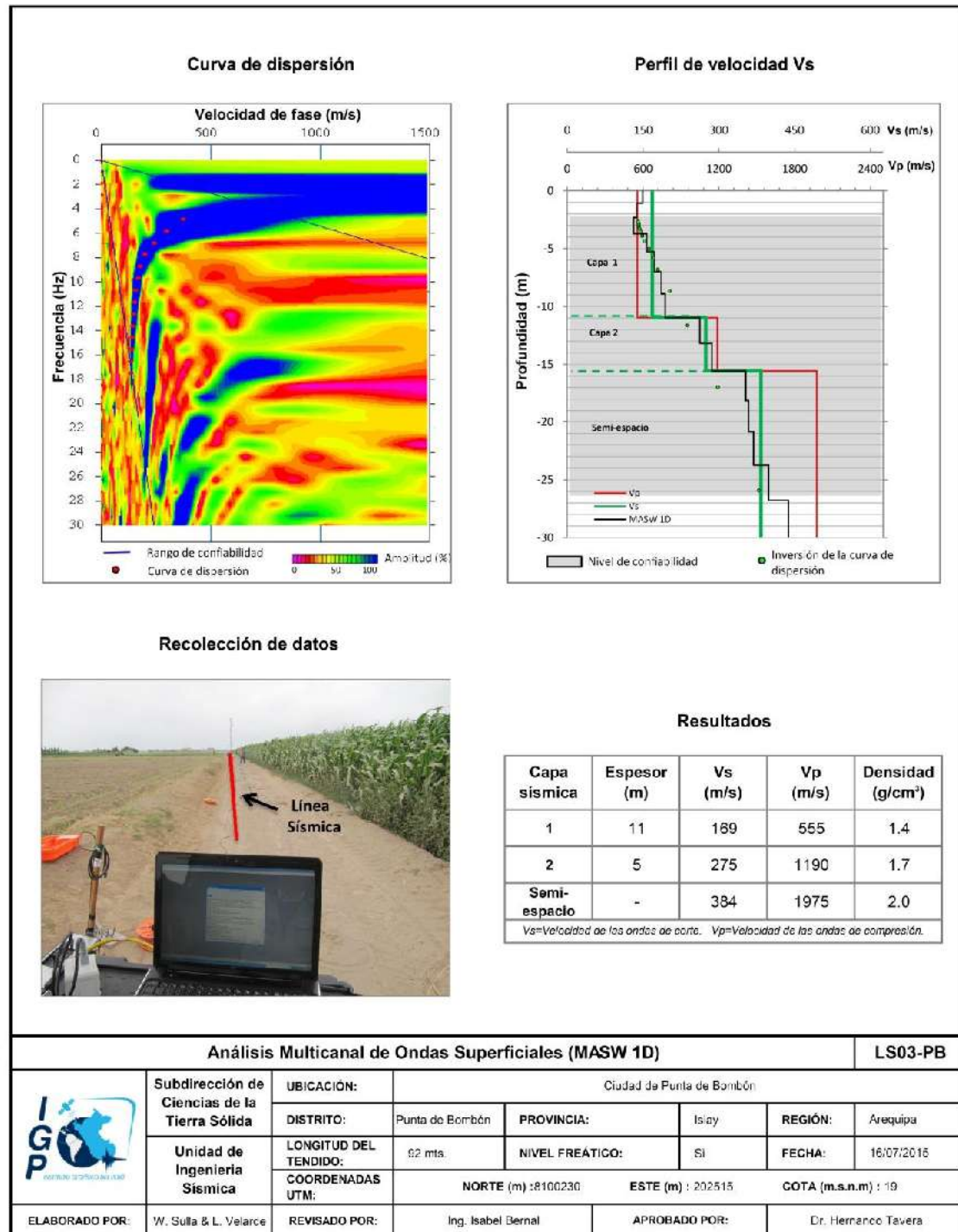


Figura 56: Continuación... / Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS03-PB.

Línea LS04-PB: Sondaje realizado en la ciudad de Punta de Bombón, a 200 metros paralelo a la avenida Olazaval. El perfil sísmico obtenido muestra valores de velocidad de la onda S (V_s) confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se identifica la presencia de 2 capas, la primera con 7 metros de espesor y velocidades V_s de 148 m/s, que sugieren la presencia de depósitos de suelos blandos. La segunda con 11 metros de espesor y velocidades V_s de 229 m/s, que estratigráficamente corresponde a suelos duros. En el semi-espacio, la velocidad de V_s es de 336 m/s correspondiente a suelos duros.

Línea LS05-PB: Sondaje realizado en la ciudad de Punta de Bombón a 270 metros de la Plaza de Armas y, donde el perfil sísmico obtenido muestra que los valores de velocidad de la onda S (V_s) son confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se ha identificado la presencia de 2 capas, la primera con 9 metros de espesor y velocidades V_s de 161 m/s, correspondientes a suelos blandos. La segunda con espesores de 12 metros y velocidades V_s de 319 m/s, que estratigráficamente corresponde a suelos duros. Finalmente, el semi-espacio alcanza velocidades mayores de 428 m/s, correspondiendo a suelos muy duros.

Línea LS06-PB: Sondaje realizado en ciudad de Punta de Bombón, a 100 metros de la carretera Víctor Lira y próximo al sector El Pino, donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S (V_s) son confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se ha identificado 2 capas, la primera con espesores de 9 metros y velocidades V_s de 173 m/s, correspondiendo a suelos blandos. La segunda con 9 metros de espesor y velocidades V_s de 294 m/s, que estratigráficamente corresponden a suelos duros. En el semi-espacio la velocidad V_s es de 397 m/s.

Línea LS07-PB: Sondaje realizado en el sector La Pampilla, a 300 metros de la plaza principal y donde el perfil sísmico obtenido muestra que los valores de velocidad de la onda S (V_s) confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se ha identificado la presencia de 2 capas, la primera con 5 metros de espesor y velocidades V_s de 262 m/s correspondiente a suelos duros. La segunda con espesores de 13 metros y velocidades V_s de 347 m/s, que sugieren suelos duros a muy duros. En el semi-espacio las velocidades V_s es de 522 m/s y corresponden a suelos muy duros.

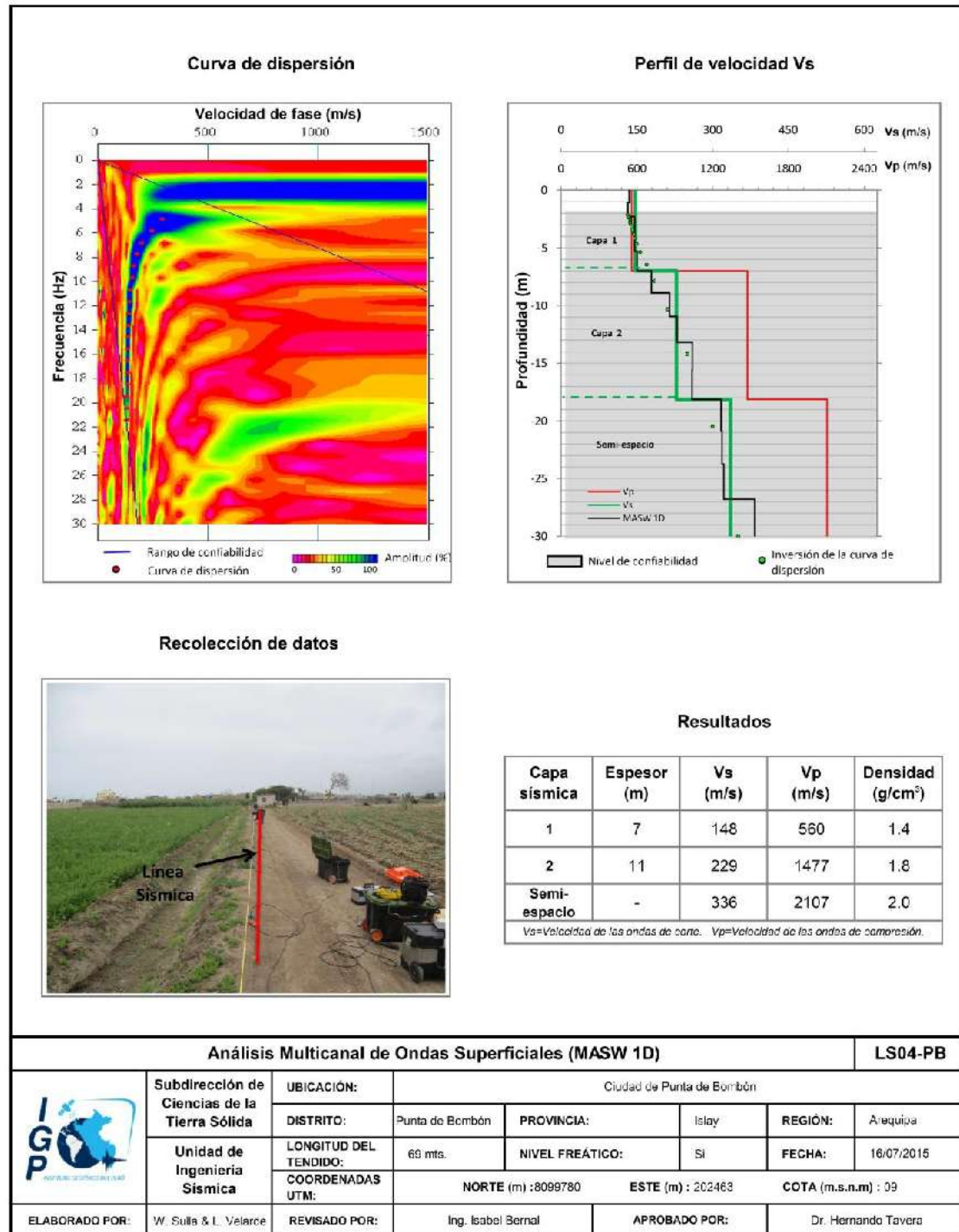


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS04-PB.

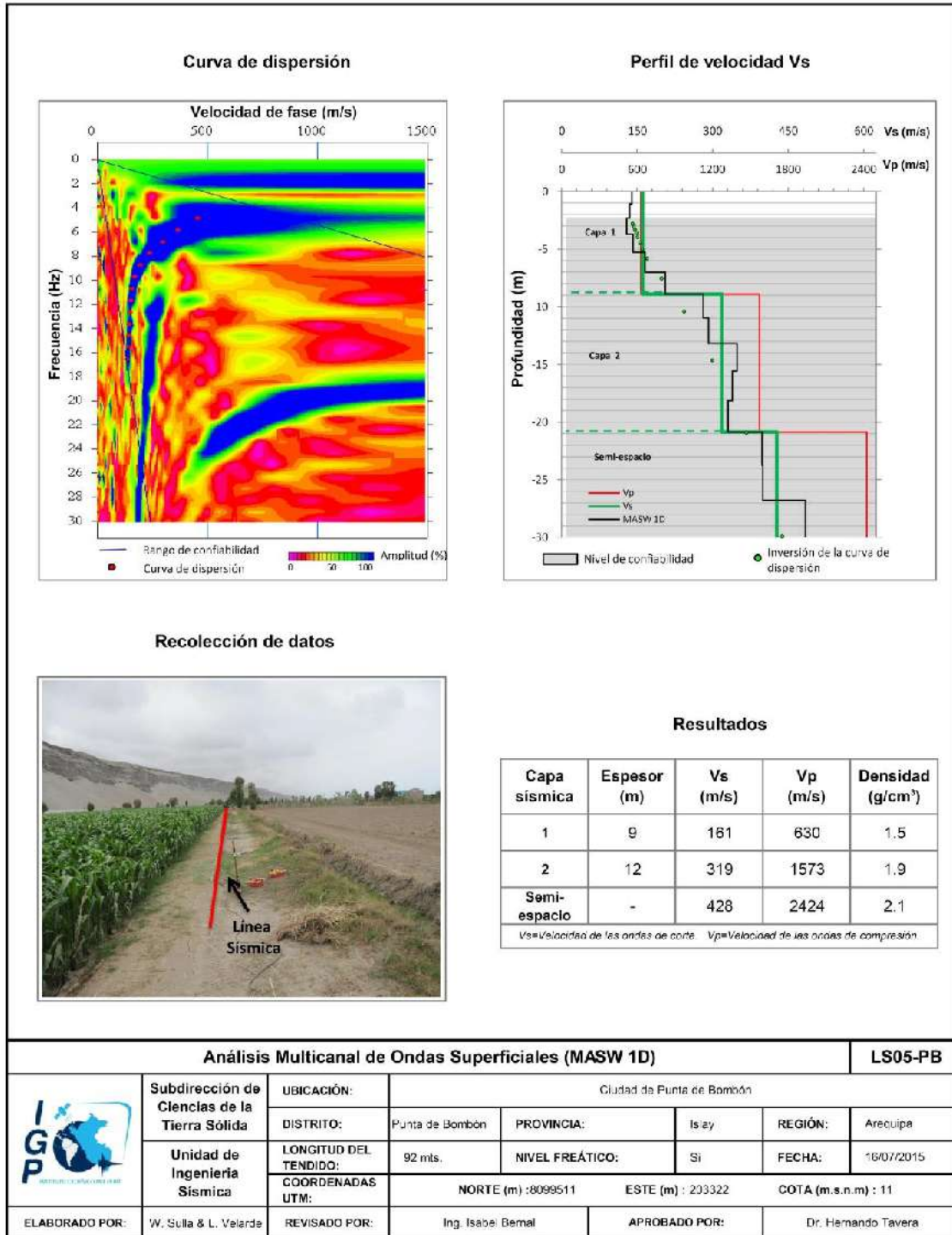


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS05-PB.

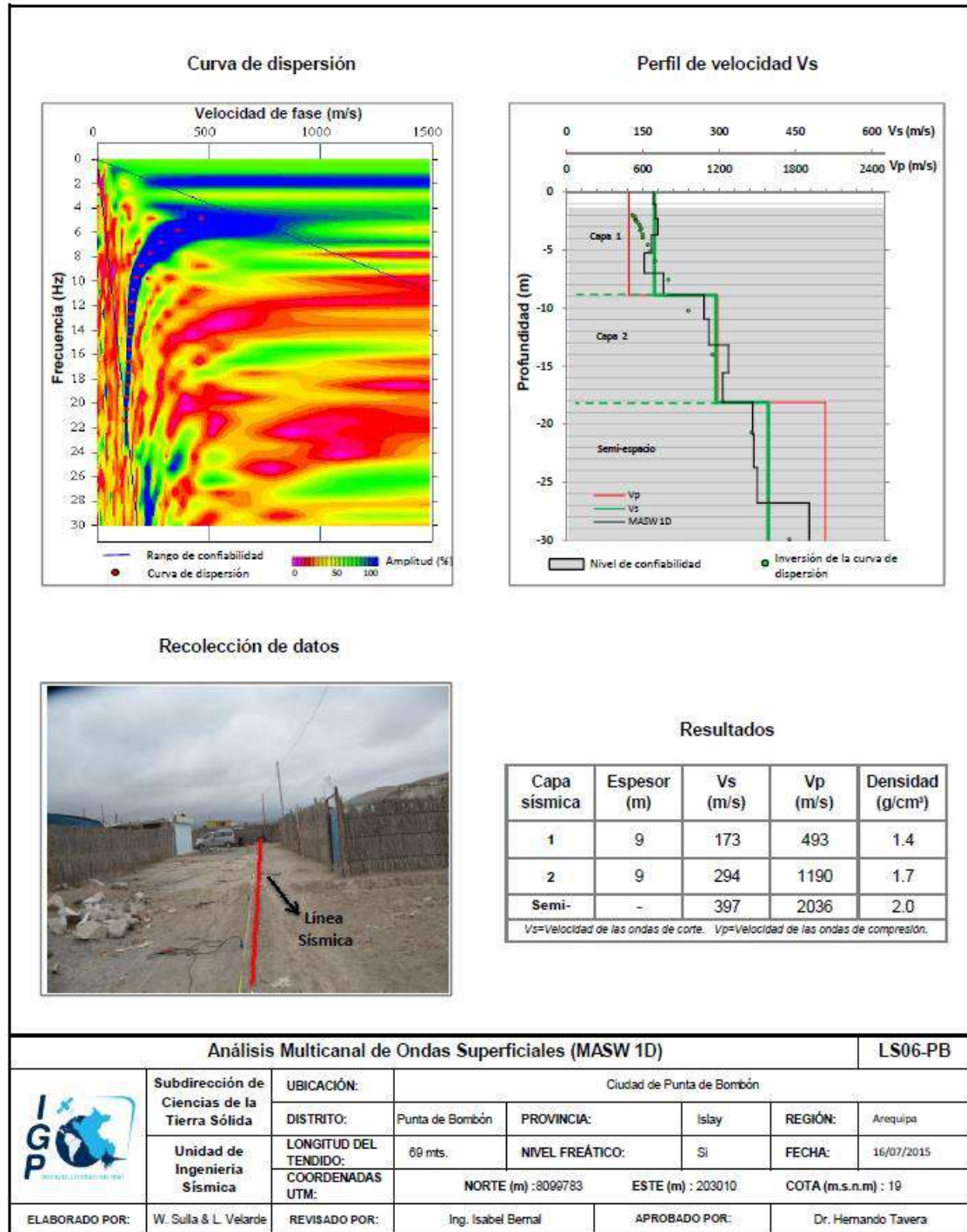


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS06-PB.

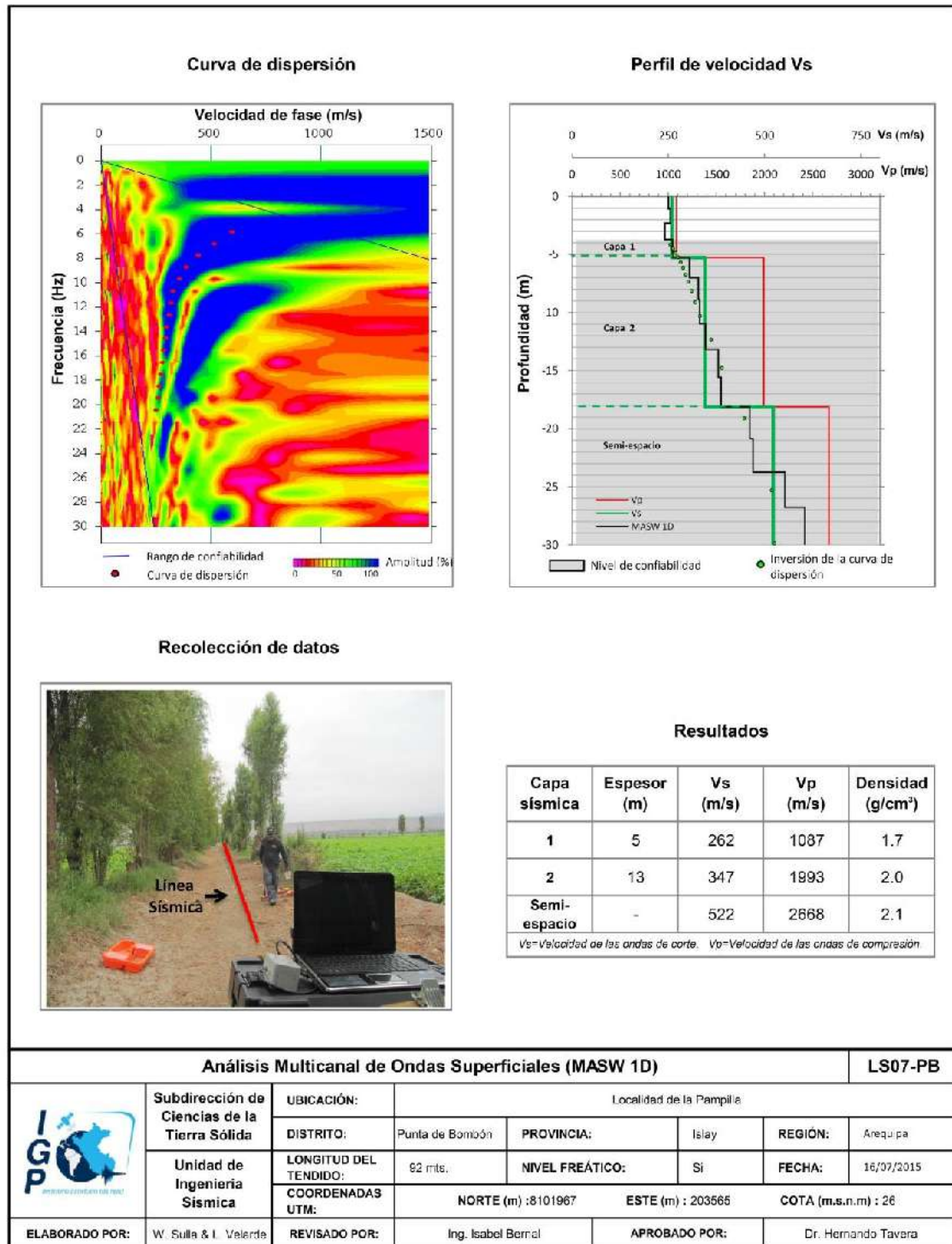


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS07-PB.

Línea LS08-PB: Sondaje realizado en el Sector Mirador Sur, donde el perfil sísmico obtenido muestra que los valores de velocidad de la onda S (V_s) son confiables hasta una profundidad de 30 metros. Se ha identificado la presencia de 2 capas, la primera con espesores de 9 metros y velocidades V_s de 355 m/s, que estratigráficamente corresponden a suelos duros. La segunda con 9 metros de espesor y velocidades V_s de 497 m/s, correspondientes a suelos muy duros. El semi-espacio alcanza velocidades mayores de 610 m/s, que sugiere suelos mucho más compactos que lo obtenido en los anteriores perfiles.

Línea LS09-PB: Sondaje realizado en el AA.H.H. Víctor Andrés Belaunde y donde el perfil sísmico muestra que los valores de velocidad de la onda S (V_s) son confiables hasta una profundidad de 30 metros, Se ha identificado la presencia de una capa de 18 metros de espesor y con velocidades de V_s de 380 m/s, que estratigráficamente corresponde a suelos duros. La interface con el semi-espacio tiene velocidades V_s de hasta 487 m/s y corresponden a suelos muy duros.

Los resultados obtenidos muestran que en Catas existen suelos con menor consistencia debido a que están conformados por arenas con el nivel freático muy cerca de la superficie, pudiendo dar origen al fenómeno de licuación de suelos. En la ciudad de Punta de Bombón se identificó la presencia de suelos con alto contenido de humedad coherente con la presencia de suelos fluviales arenosos y a mayor profundidad suelos gravosos con alto contenido de humedad. En el sector de La Pampilla, los valores de velocidad corresponden a suelos relativamente compactos por estar constituidos por arenas y gravas con contenido de humedad. En las zonas altas del distrito, “Alto la Punta”, los valores de velocidad son altos y corresponden a suelos más compactos asociados a la presencia de terrazas.

La principal característica de los suelos presentes en casi el 80% de la superficie de la zona de estudio, es el alto nivel freático y/o humedad, lo cual se evidencia al comparar los valores de velocidad obtenidos para las ondas P y S. Mientras que, los valores de V_s son bajos, los de V_p muestran cambios drásticos para valores mayores a 1400 m/s, propios para ondas que se propagan en suelos con alto contenido de agua.

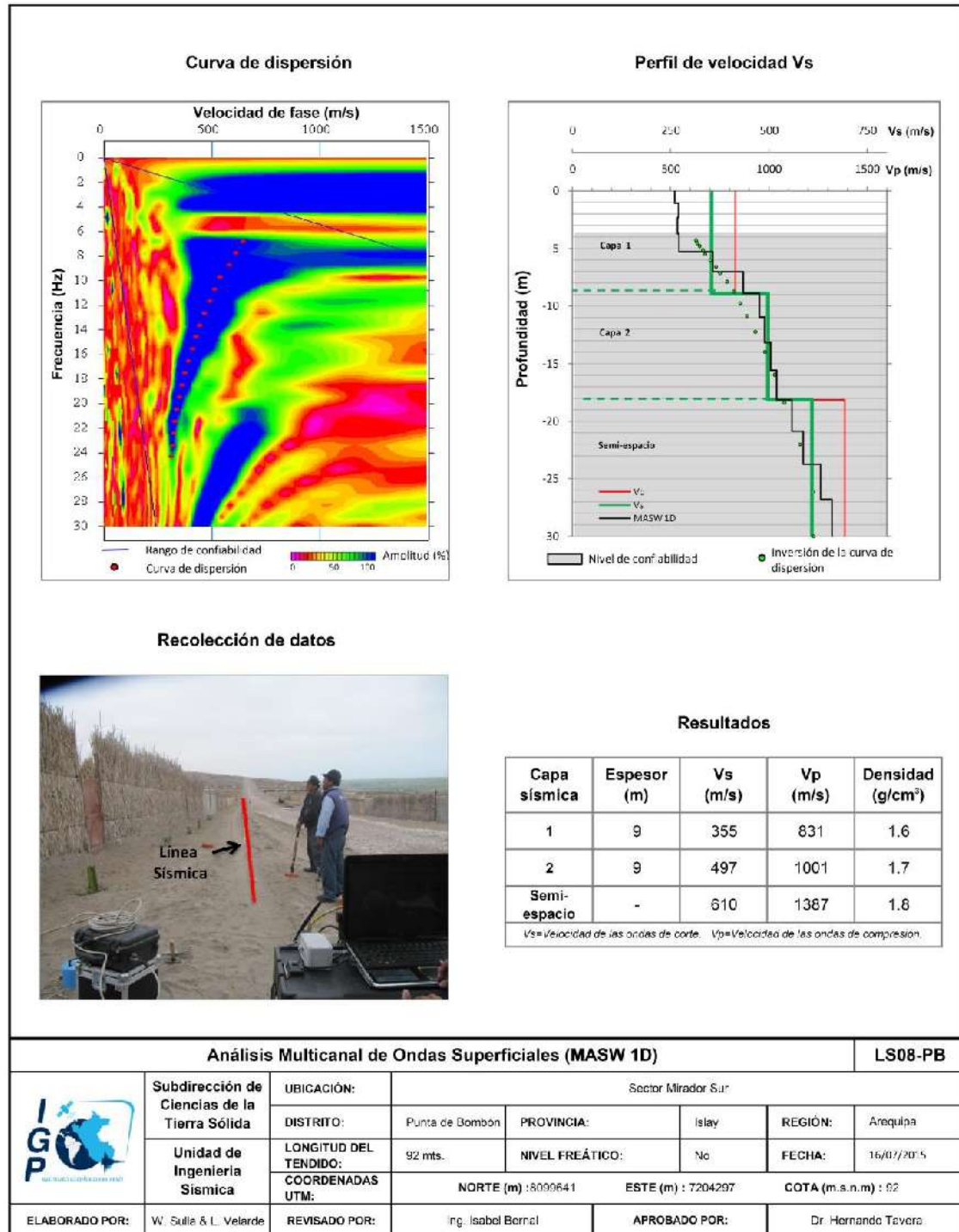


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS08-PB.

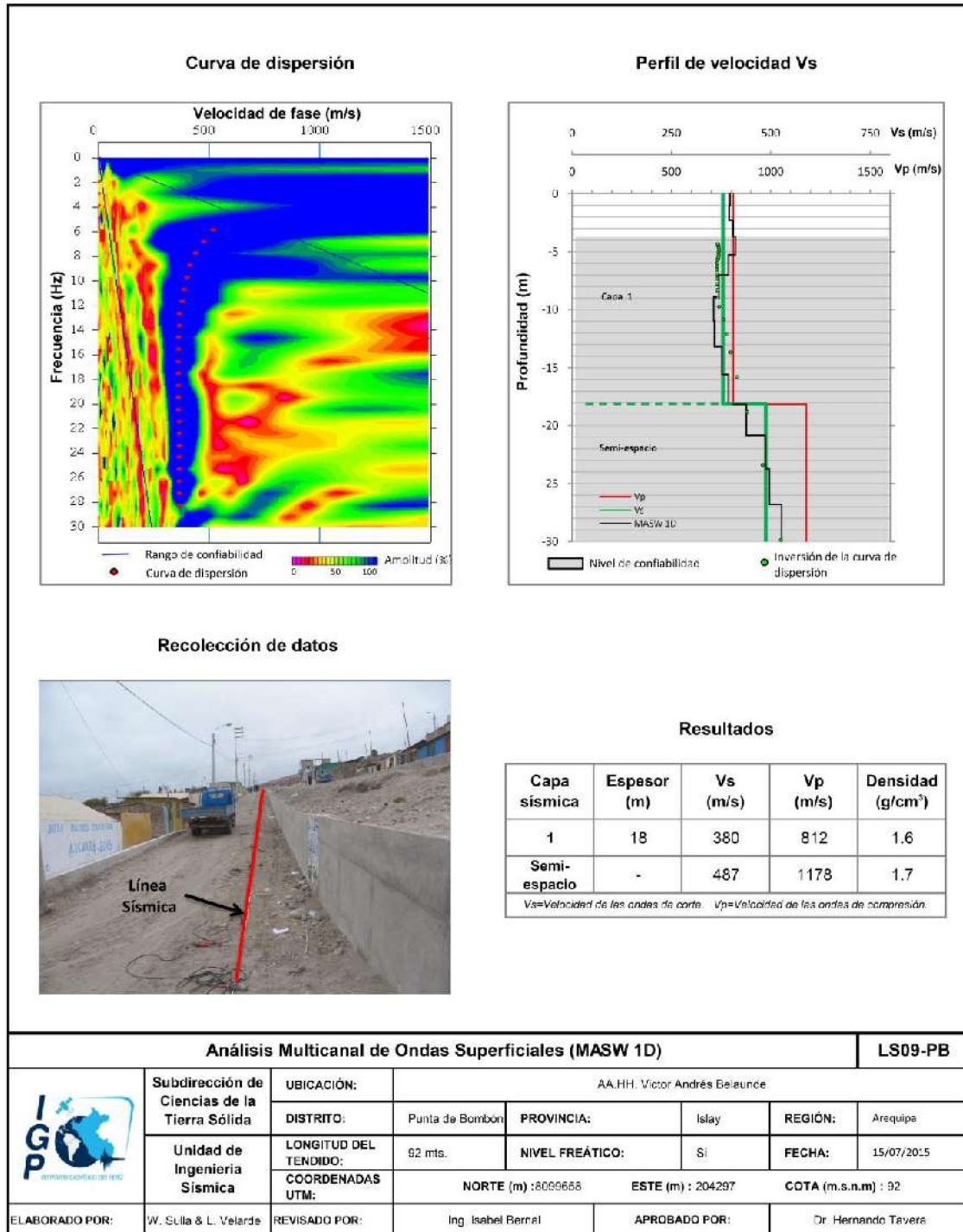


Figura 56: Continuación.../ Análisis e interpretación geofísica para los ensayos MASW, línea LS010-PB.

11.3.- Periodos Dominantes

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

En la Figura 57 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la localidad de Punta de Bombón y los resultados obtenidos permiten observar la existencia de áreas con periodos de 0.5 a 0.7 segundos distribuidos en el sector central del valle y en el área céntrica de la ciudad de Punta de Bombón. Los periodos de 0.3 a 0.5 segundos están presentes en las urbanizaciones Santa Mónica y Punta de Bombón que unen la zona baja del valle con las terrazas más elevadas y en donde los periodos varían con valores entre 0.1 y 0.3 segundos.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Acarí están relacionados por sus condiciones físico - dinámicas a través de la relación $T_0=4H/V_s$ (T_0 , periodo dominante; H , espesor del estrato y V_s , velocidad de onda de corte). Entonces, conocidos los periodos y la velocidad de las ondas de corte (V_s), se puede proceder a calcular los espesores de las capas del suelo. Asumiendo, velocidades de 180 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.5 y 0.7 segundos, se estima para la capa superficial espesores de 20 a 30 metros; sin embargo, al presentar estos suelos alto contenido de agua, los valores de espesores de capa son relativos. Para la zona alta de la ciudad se considera velocidades V_s de 380 m/s y periodos de 0.3 segundos; por lo tanto, los suelos más consistentes tendrían espesores de 26 metros.

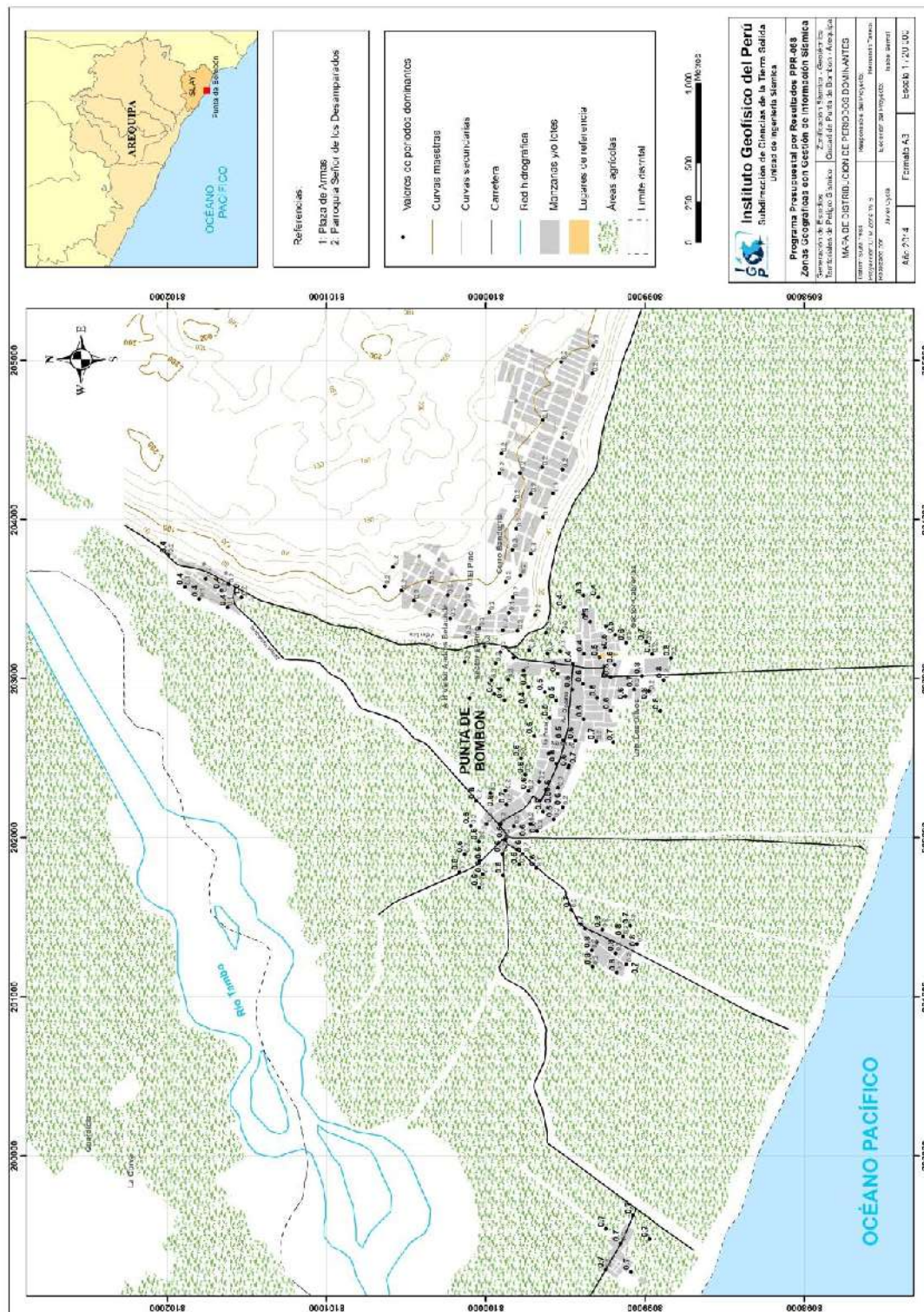


Figura 57: Mapa de la ciudad de Punta de Bombón y distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

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 Punta de Bombón se han realizado 6 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 20-25 electrodos con un espaciamiento de 6 y 10 metros entre electrodos. Estas disposiciones permiten tener tendidos longitudinales de 144, 190 y 240 metros, lo cual facilita tener alcances en profundidad del orden de 20 y 30 metros (Figura 58).

A continuación, se describe las características de cada uno de las secciones geo-eléctricas obtenidas a fin de conocer el valor real de la resistividad del subsuelo, en la ciudad de Punta de Bombón (Figura 59).

Sección geo-eléctrica L01-PB: *Realizada en Catas, al suroeste del sector central del área urbana. En esta sección predominan valores bajos resistivos y muy bajos resistivos. A lo largo de la sección, se distribuyen valores de 20 a 100 ohm.m, hasta una profundidad promedio de 10 metros, para luego disminuir hasta los 5 ohm.m, a profundidades que van entre 10 y 39 metros. Estos valores son asociados a la saturación de los terrenos de cultivo que se encuentran próximos a la línea y a la presencia del mar a menos de 1 kilómetro. Los materiales presentes son suelos de tipo arenoso, limoso y arcilloso.*

Sección geo-eléctrica L02-PB: *Realizada en el área urbana de Bombón. En esta sección, predominan valores bajos resistivos. A lo largo de la sección se distribuyen valores entre 20 y 100 ohm.m, con profundidades variables que llegan hasta los 23 metros, valores mayores a 100 ohm.m, se distribuyen entre los electrodos 30-65 y 72-84. A lo largo de la línea se observa la presencia de vegetación, lo cual sugiere que los suelos reciben aporte de agua. Los materiales observados en la superficie son suelos limosos, arcillosos y arenosos.*

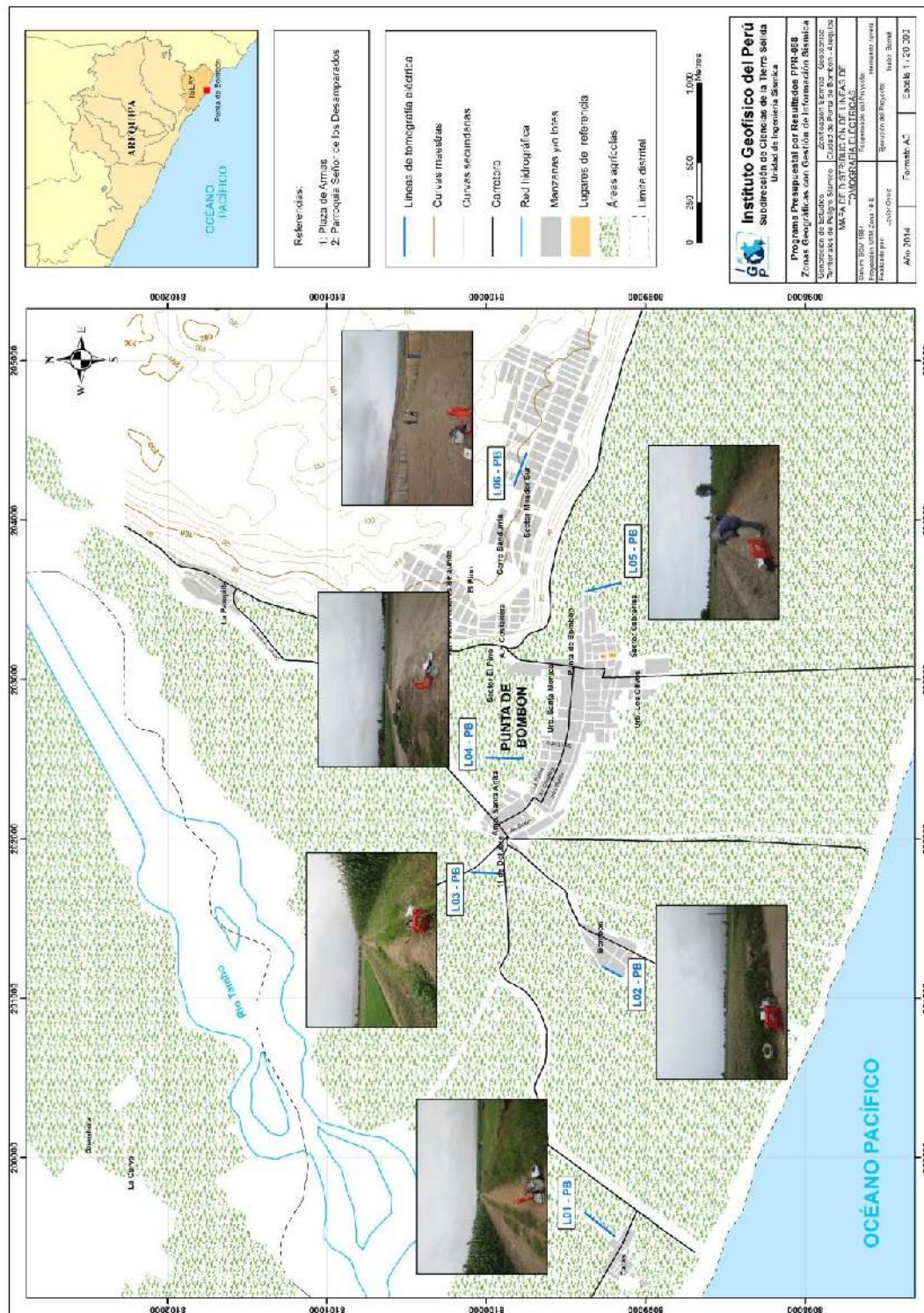


Figura 58: Mapa de la ciudad de Punta de Bombón y distribución de las líneas de tomografía eléctrica.

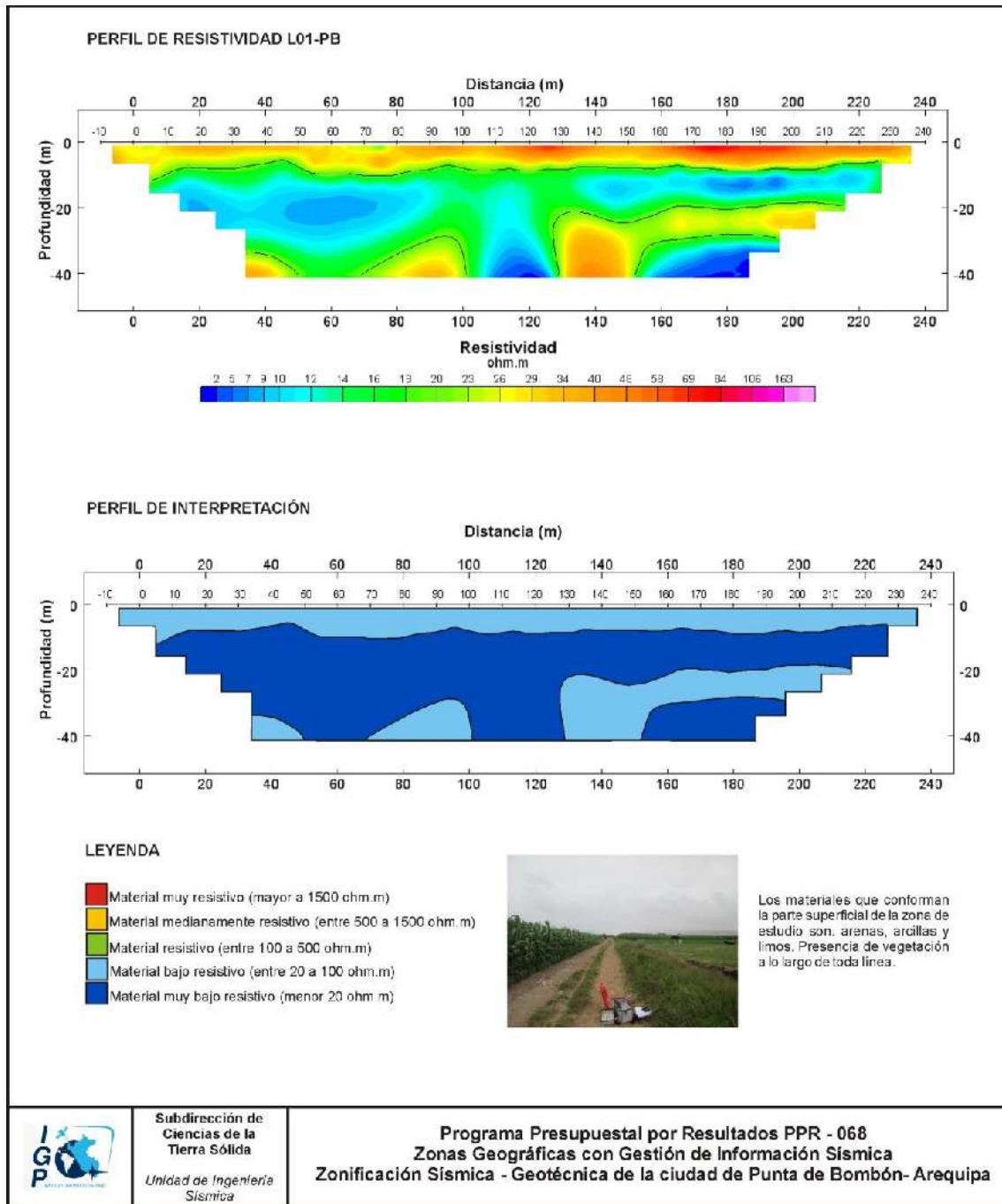


Figura 59: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-PB.

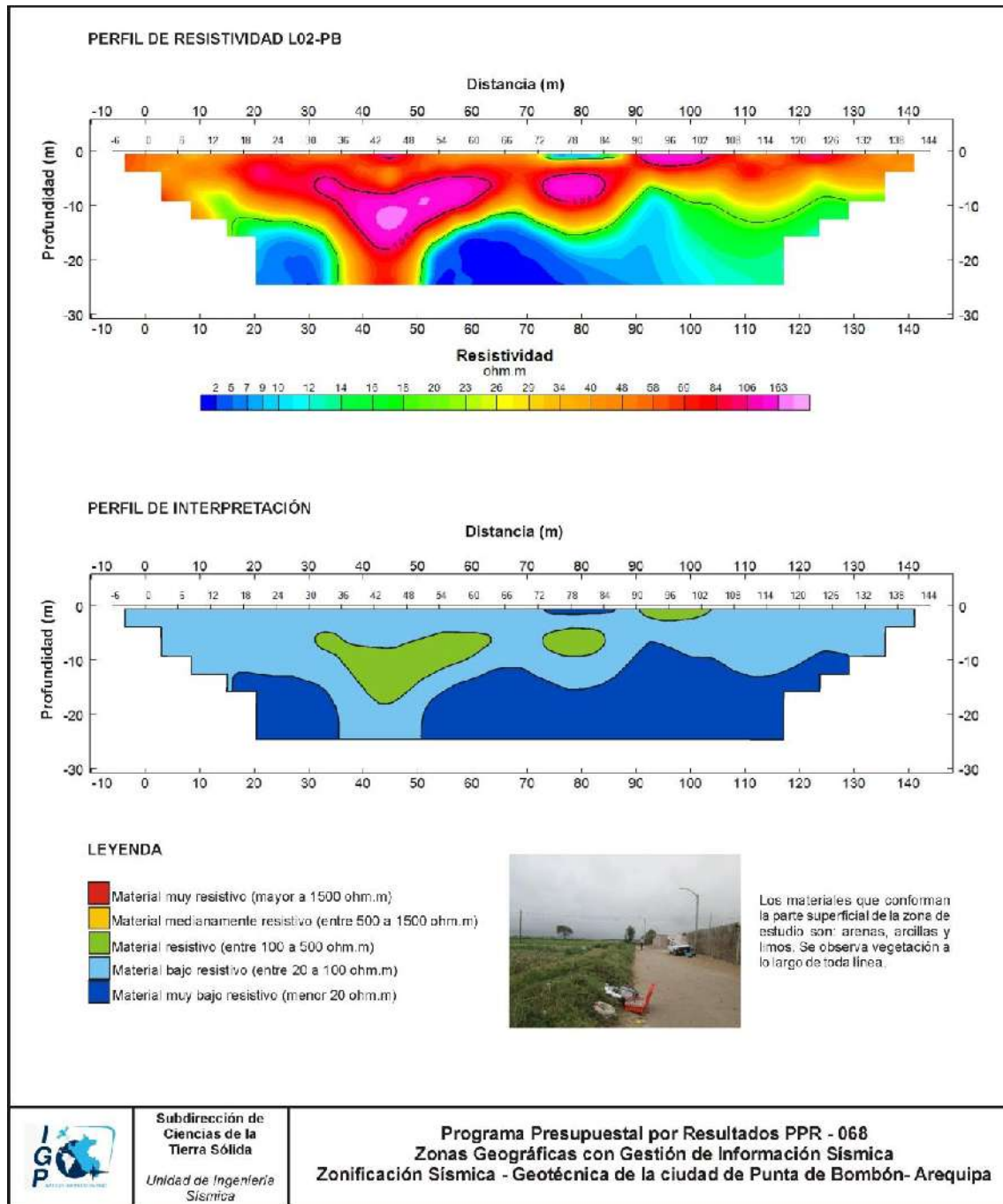


Figura 59: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-PB.

Sección geo-eléctrica L03-PB: Realizada al noroeste del sector central del área urbana de Punta de Bombón, en la Av. Colon, próximo al camal municipal y sobre terreno de cultivo. En esta sección predominan valores bajo resistivos. A lo largo de toda la sección se observa valores entre 100 y 500 ohm.m hasta niveles de profundidad entre 3 a 8 metros. Por debajo de estos valores, se tiene otros que van entre 2 y 100 ohm.m. En esta sección, la saturación de los suelos se debe a que la línea fue realizada en terreno agrícola con presencia de vegetación. Los materiales observados en superficie son suelos arenosos, limosos, arcillosos y gravas.

Sección geo-eléctrica L04-PB: Realizada en el extremo norte del área urbana de la ciudad de Punta de Bombón con el predominio de valores bajo resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 20 y 100 ohm.m, a profundidades variables que llegan hasta los 39 metros. A mayor profundidad, valores de 2 y 20 ohm.m se distribuyen en forma de dos diques que no llegan a la superficie y un elipsoide entre los electrodos 82 y 118. Los valores mayores de resistividad se distribuyen en la parte superficial de la sección tomando formas alargadas y elipsoidales. Es notorio que los terrenos de cultivo, próximos a la línea, producen la saturación de los suelos compuestos por arcillas y limos.

Sección geo-eléctrica L05-PB: Realizada en el extremo sureste del área urbana de la ciudad de Punta de Bombón, perpendicular a la calle San Martín y con el predominio de valores bajos resistivos. A lo largo de toda la sección se distribuyen valores entre 20 y 100 ohm.m a profundidades variables. Los valores entre 2 y 20 ohm.m se distribuyen en profundidad tomando formas irregulares. Los valores mayores se encuentran en el extremo superior izquierdo de la sección, llegando hasta 5 metros de profundidad. A lo largo de la línea se observa vegetación lo cual es indicativo de la presencia de suelos saturados. Los materiales que conforman la parte superficial de la zona de estudio son suelos de tipo limoso, arcilloso y arenoso.

Sección geo-eléctrica L06-PB: Realizada en el extremo noreste del área urbana del Sector Mirador Sur con el predominio de valores de muy bajos resistivos a medianamente resistivos. En superficie se distribuyen valores mayores a 500 ohm.m, desde el electrodo 118 hasta el final de la sección con profundidades promedio de 5 metros. Estos valores de resistividad también

están presentes entre los electrodos 105 y 125 con formas de diques. Valores entre 100 y 500 ohm.m se observan por debajo de los valores mayores a la altura de los electrodos 90 y 118, tomando formas elipsoidales. La distribución de valores entre 2 y 100 ohm.m, se asocia a la presencia de aguas residuales generadas por la población. Los materiales presentes en la zona de estudios son predominantemente suelos arenosos.

En resumen, la distribución de los valores de resistividad, evidencian la presencia de valores bajos resistivos a muy bajos resistivos presentes en el extremo Este del área urbana de la ciudad de Punta de Bombón. Estos valores están asociados a la presencia de zonas de cultivo y otras en la proximidad del mar. En el Sector Mirador Sur y Cerro bandurria, los valores define suelos medianamente resistivos.

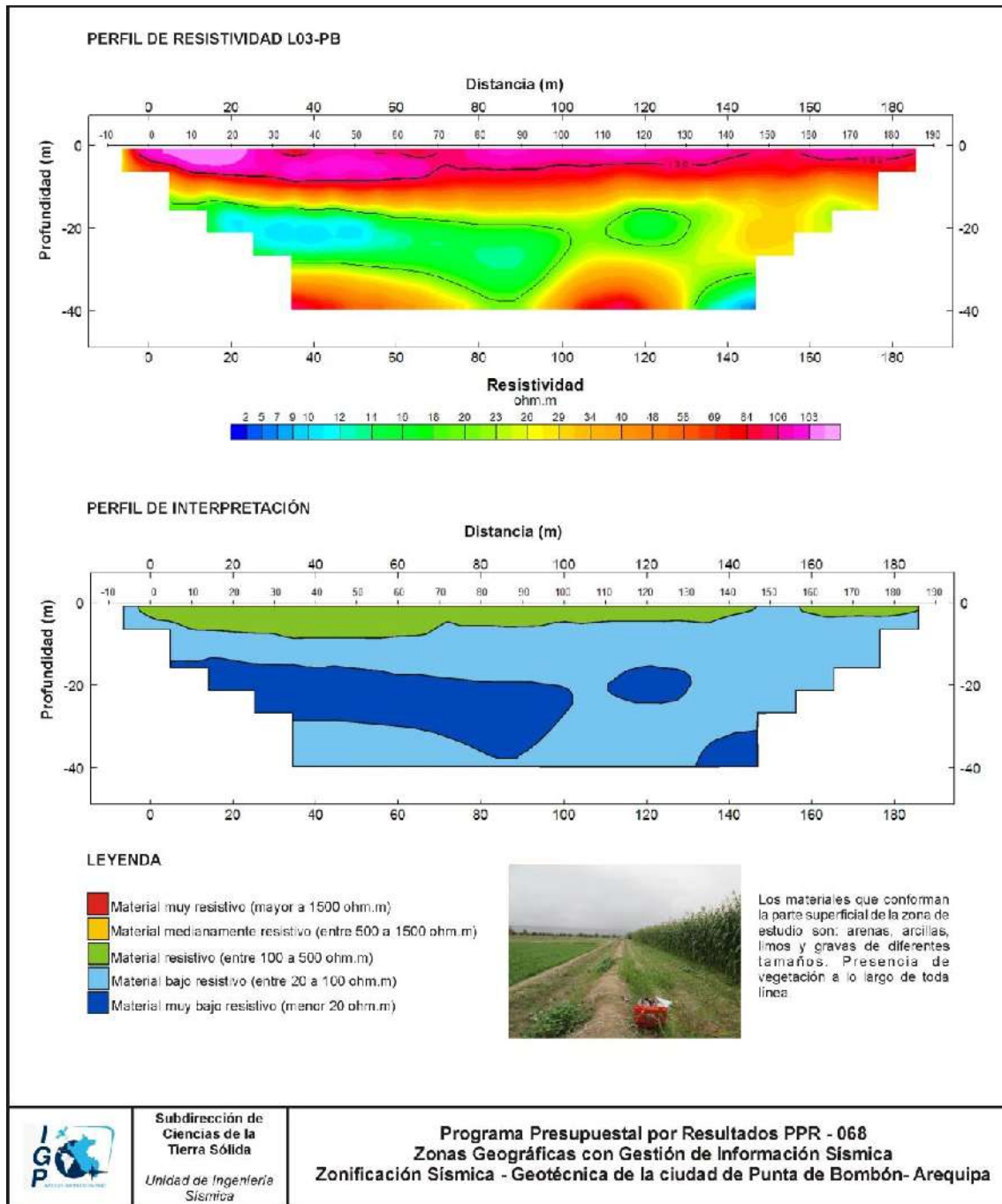


Figura 59: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-PB.

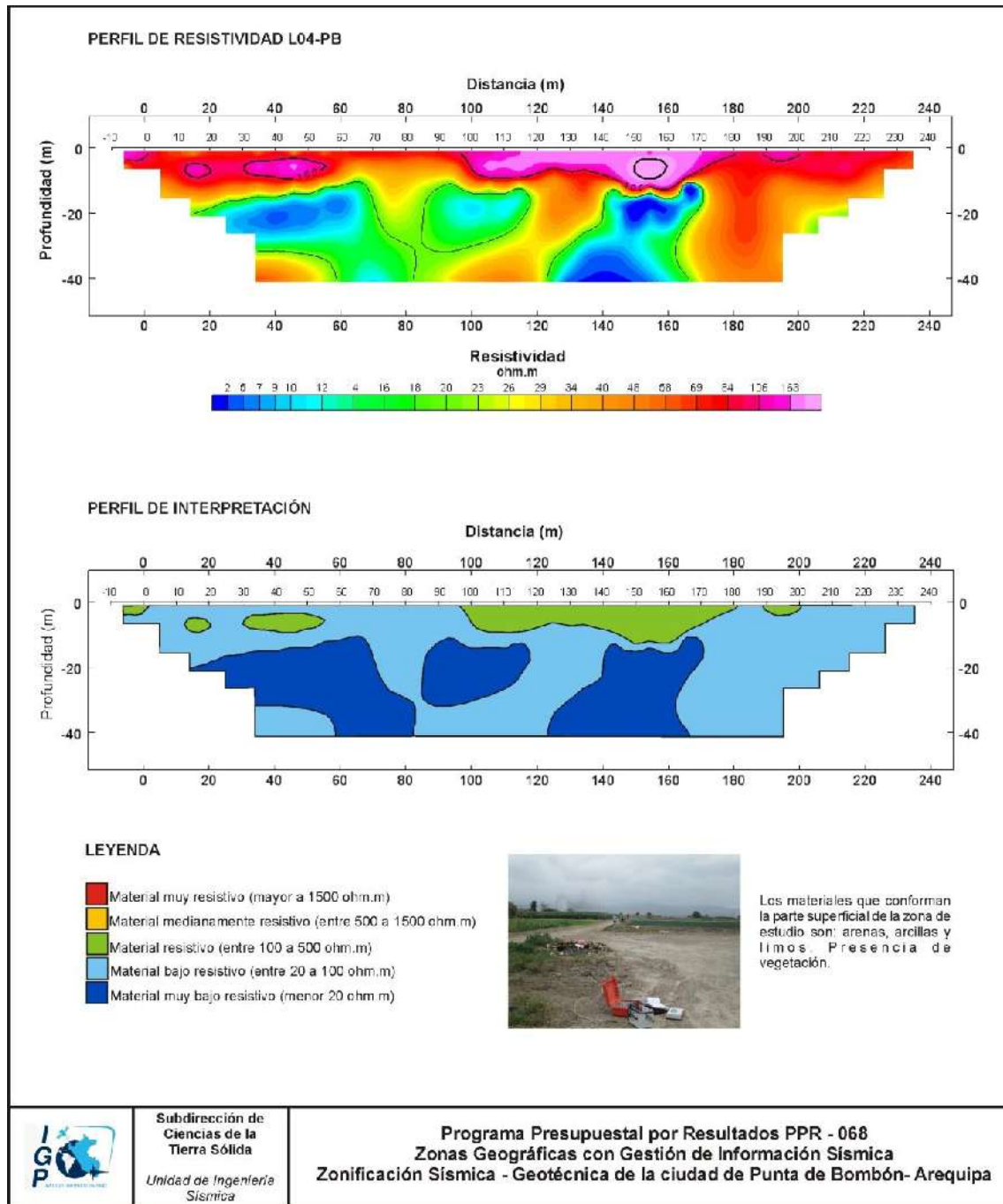


Figura 59: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-PB.

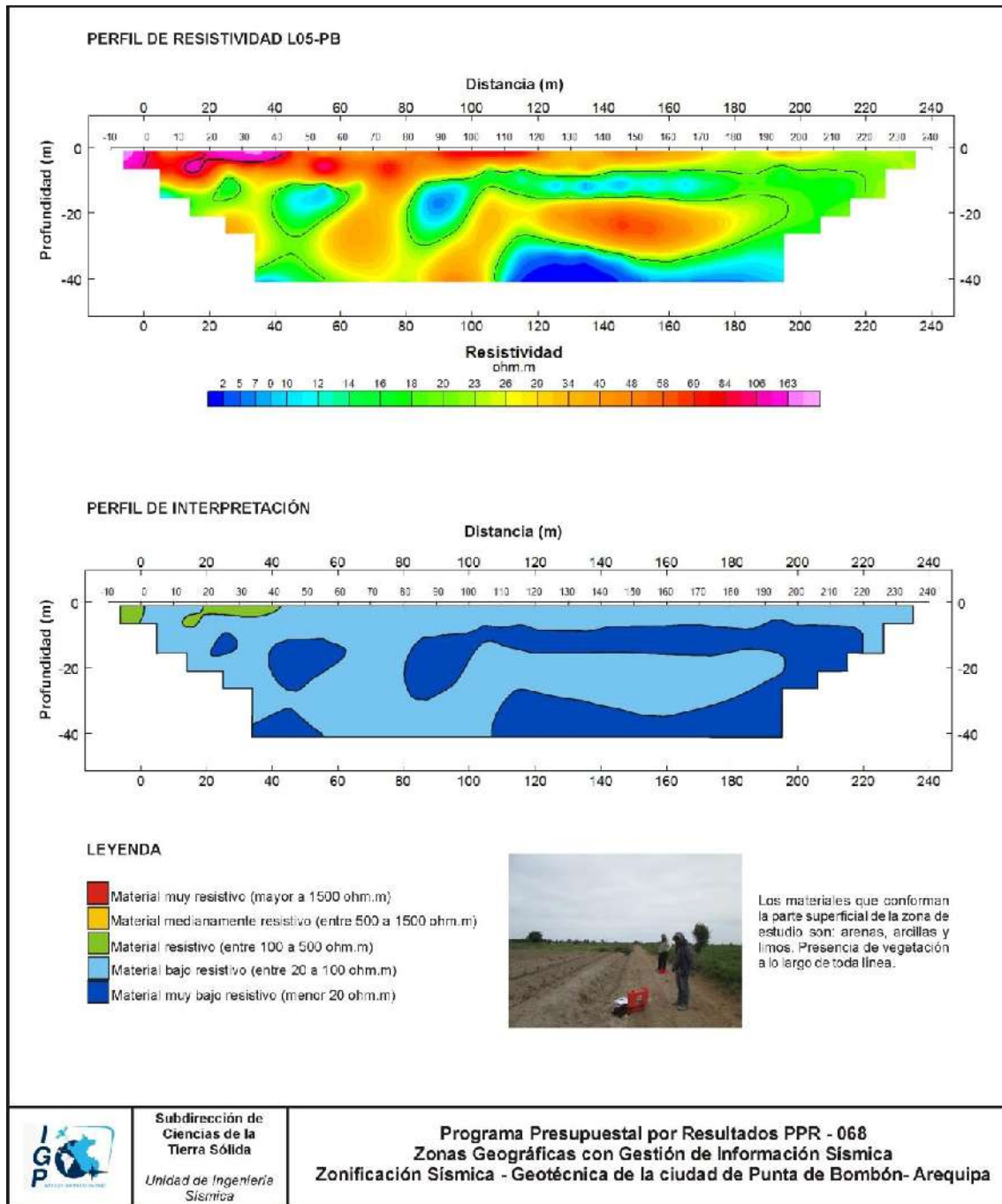


Figura 59: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L05-PB.

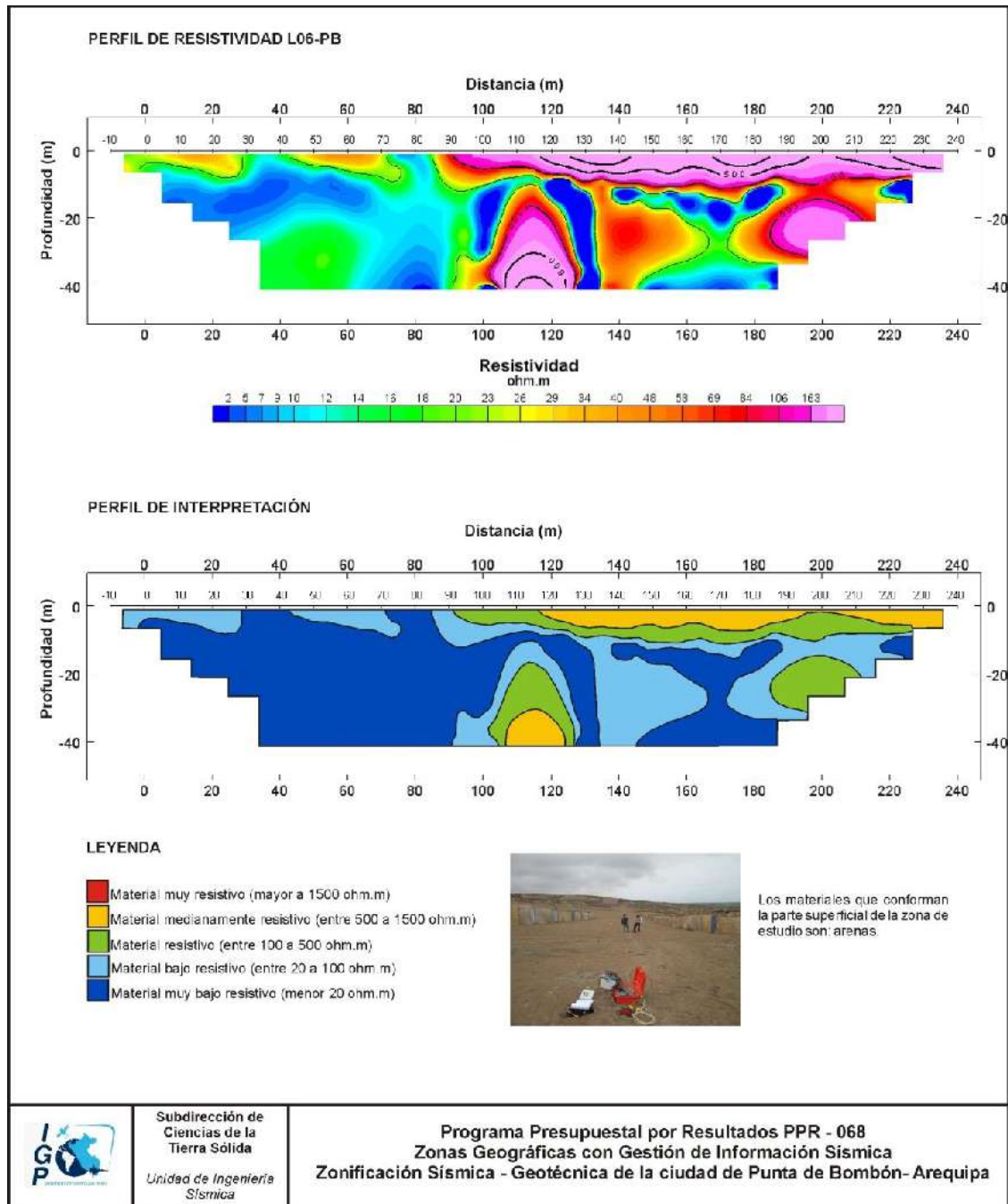


Figura 59: Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L06-PB.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Punta de Bombón considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Punta de Bombón, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de dos tipos de suelo: Tipo S1, S2 y S3.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Punta de Bombón se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 60):

ZONA I: Esta zona es parte de una terraza marina que se prolonga hacia el Sureste de la ciudad y superficialmente están cubiertos por materiales aluviales, arenas o arcillas. Solo en ciertos sectores se observa la presencia de gravas y arenas bien estratificadas. Estos suelos responden a periodos que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 según la norma sismorresistente peruana. Los suelos presentan una capacidad portante alta ($> 3 \text{ kg/cm}^2$).

ZONA II: Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores de hasta 5 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene material que conforma una terraza aluvial constituida por clastos subangulosos de origen ígneo y sedimentario. Esta zona se considera como de transición ya que une la zona baja del valle con las terrazas más elevadas. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.3 y 0.5 segundos. Los suelos presentan capacidad portante de media a baja.

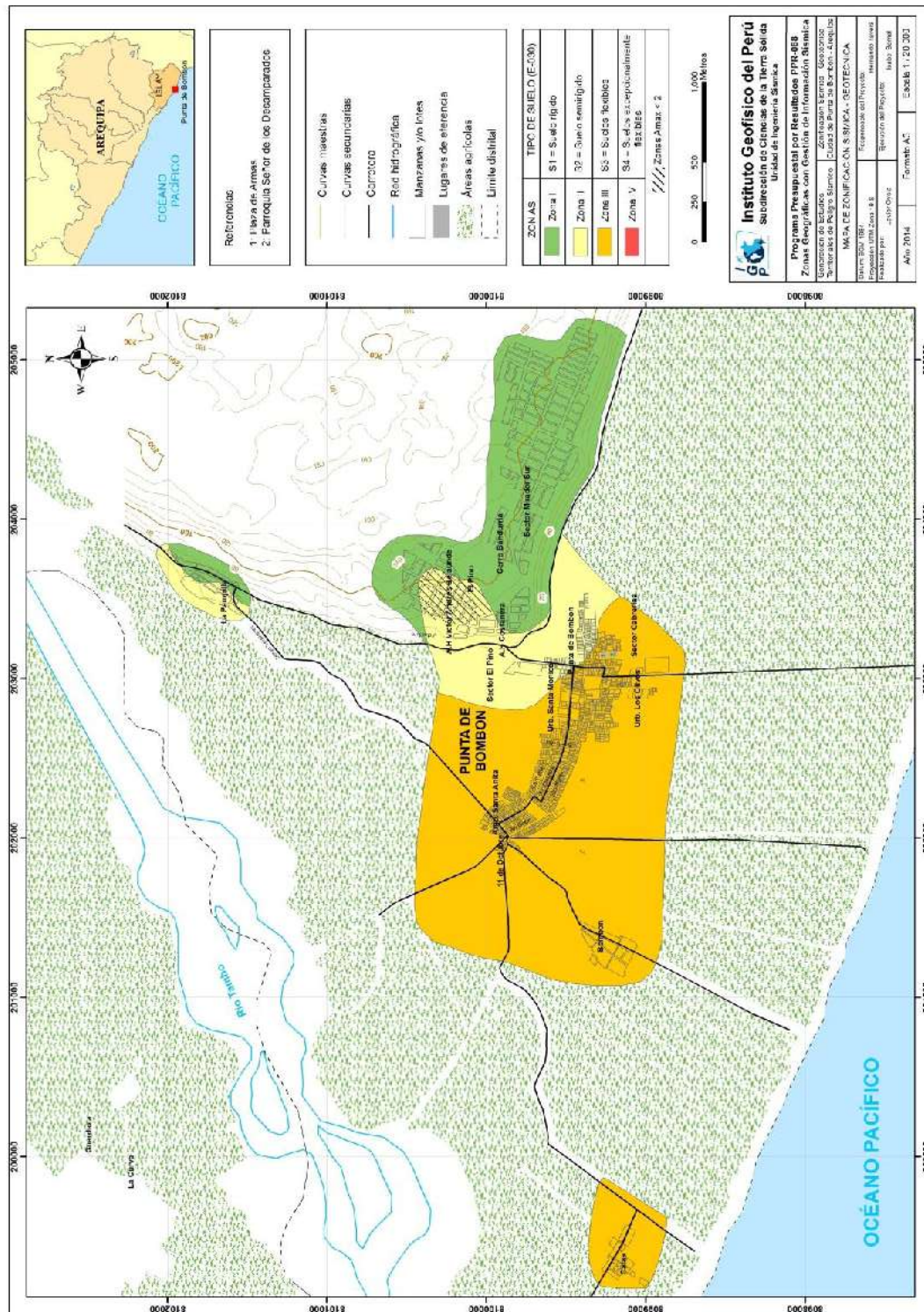


Figura 60: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Punta de Bombón.

ZONA III: Zona conformada, en su mayor parte, por depósitos de aluviales recientes con suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentran en estado moderadamente consistente. Esta zona contiene al 80% de la población de la ciudad de Punta de Bombón. Los periodos predominantes identificados en estos suelos fluctúan entre 0.5 y 0.7 segundos; por lo que, su comportamiento dinámico es tipificado como un suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. Presenta una capacidad portante baja que fluctúa entre 1.0 y 2.0 kg/cm².

En la ciudad de Punta de Bombón, los suelos adicionalmente responden a periodos que fluctúan entre 1.0 y 1.6 segundos, valores que no son analizados en este estudio, pero deben ser tomados en cuenta en el análisis dinámico de las edificaciones que se pudieran construir sobre estos suelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

El 80% de la superficie sobre la cual se encuentra la ciudad de Punta de Bombón corresponde a una terraza fluvial constituida por clastos de origen ígneo redondeadas a subredondeadas y cuyos diámetros no superan los 10 cm, en una matriz arenosa o areno limosa típico de los depósitos fluviales.

El Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica indica que la ciudad de Punta de Bombón se encuentra sobre suelos Tipo S1, S2 y S3; es decir, los correspondientes a las zonas: Zona I, Zona II y Zona III definidas en la Norma Sismorresistente Peruana.

RECOMENDACIONES

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

BIBLIOGRAFÍA

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

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

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

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

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

MAPAS