



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 CHALA

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Chala – Caravelí – Arequipa

Responsable: Hernando Tavera

Lima – Perú
2015



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE CHALA

Provincia de Caravelí – 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 Añezco

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 Chala, distrito de Chala, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos.

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

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Chala 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.

ÍNDICE

RESÚMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

ANEXOS

1.- INTRODUCCIÓN

2.- OBJETIVOS

3.-UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

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.- Estudio de Tsunamis

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.- Modelado Marino

9.1.1.2.- Origen Tectónico

9.2.- Geología

9.2.1.- Geología Regional

9.2.2.- Geología Local

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

10.- GEOTÉCNIA

- 10.1.- Capacidad de Carga Admisible
- 10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

- 11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V
- 11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos
- 11.3.- Periodos Dominantes
- 11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA

- 12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

MAPAS

ANEXOS - CD

- ANEXO 1: Fichas de Calicatas
- ANEXO 2: Fichas de Ensayo de Densidades
- ANEXO 3: Fichas de Ensayo de Penetración Dinámica Ligera
- ANEXO 4: Fichas de Posteo
- ANEXO 5: Mapas formato A3

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

1.- INTRODUCCIÓN

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

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

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

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Chala, es uno de los trece distritos de la Provincia de Caravelí, ubicada en el Departamento de Arequipa, bajo la administración del Gobierno regional de Arequipa, en el sur del Perú (Figura 2). Limita por el norte con el distrito de Atiquipa, por el este con el distrito de Huanuhuanu, por el sur con el distrito de Chaparra y por el oeste con el Océano Pacífico. Desde el punto de vista jerárquico de la Iglesia Católica, forma parte de la Prelatura de Caravelí en la Arquidiócesis de Arequipa.

El distrito fue fundado durante la época republicana el 2 de enero de 1857, en el gobierno del Presidente Ramón Castilla. Su capital es el Puerto de Chala. De acuerdo al Censo del año 2007, el distrito tiene un área de 378.38 km² y una población de 5194 habitantes, a razón de 13.73 hab/km². Chala es un activo puerto pesquero y comercial, la presencia de la carretera Panamericana sur (Km. 620) le da tal dinamismo, además la minería artesanal del oro, en las quebradas altas de la pProvincia de Caravelí hace que se viva una intensa y febril actividad por la comercialización del preciado metal.

En los meses de verano, Chala se llena de visitantes y veraneantes, que vienen de diferentes puntos del país y hasta del extranjero para disfrutar de sus playas y su buena comida hecha a base de productos marinos. Muy cerca de Chala, se encuentra Puerto Inca, sitio arqueológico, donde el soberano Inca tomaba sol en el verano y representa ser las únicas ruinas Incas en el Perú que se encuentra a orillas del mar, siendo visitado por turistas nacionales y extranjeros.

El Distrito de Chala, presenta un hermoso paisaje y mirador natural, habitada por gente amigable. En el horizonte se observa fijamente el mar azul y un cielo totalmente iluminado por los rayos solares. Entre los principales atractivos presenta, sus playas, cerros de arena y los restos arqueológicos.

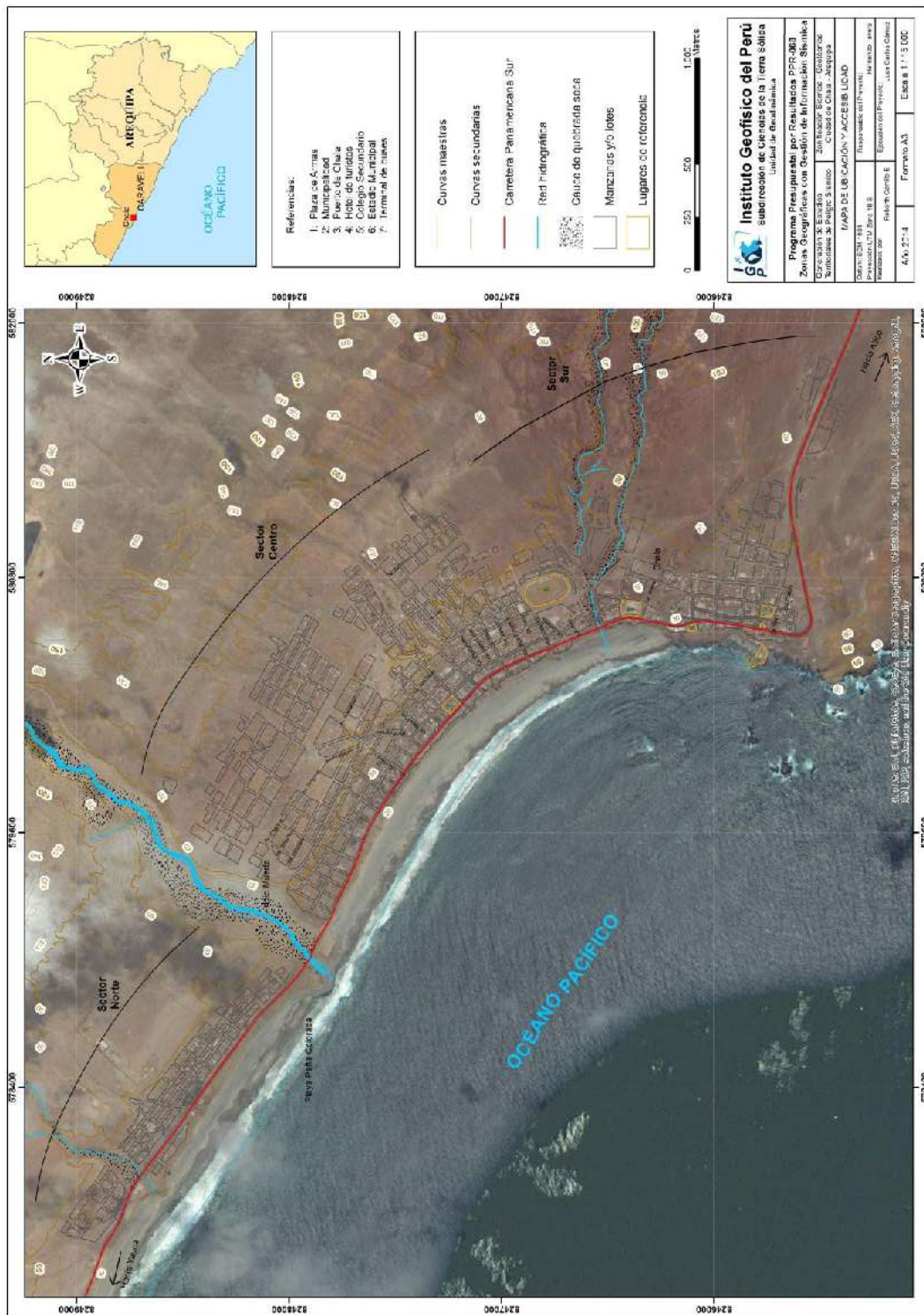


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Chala, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa

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.

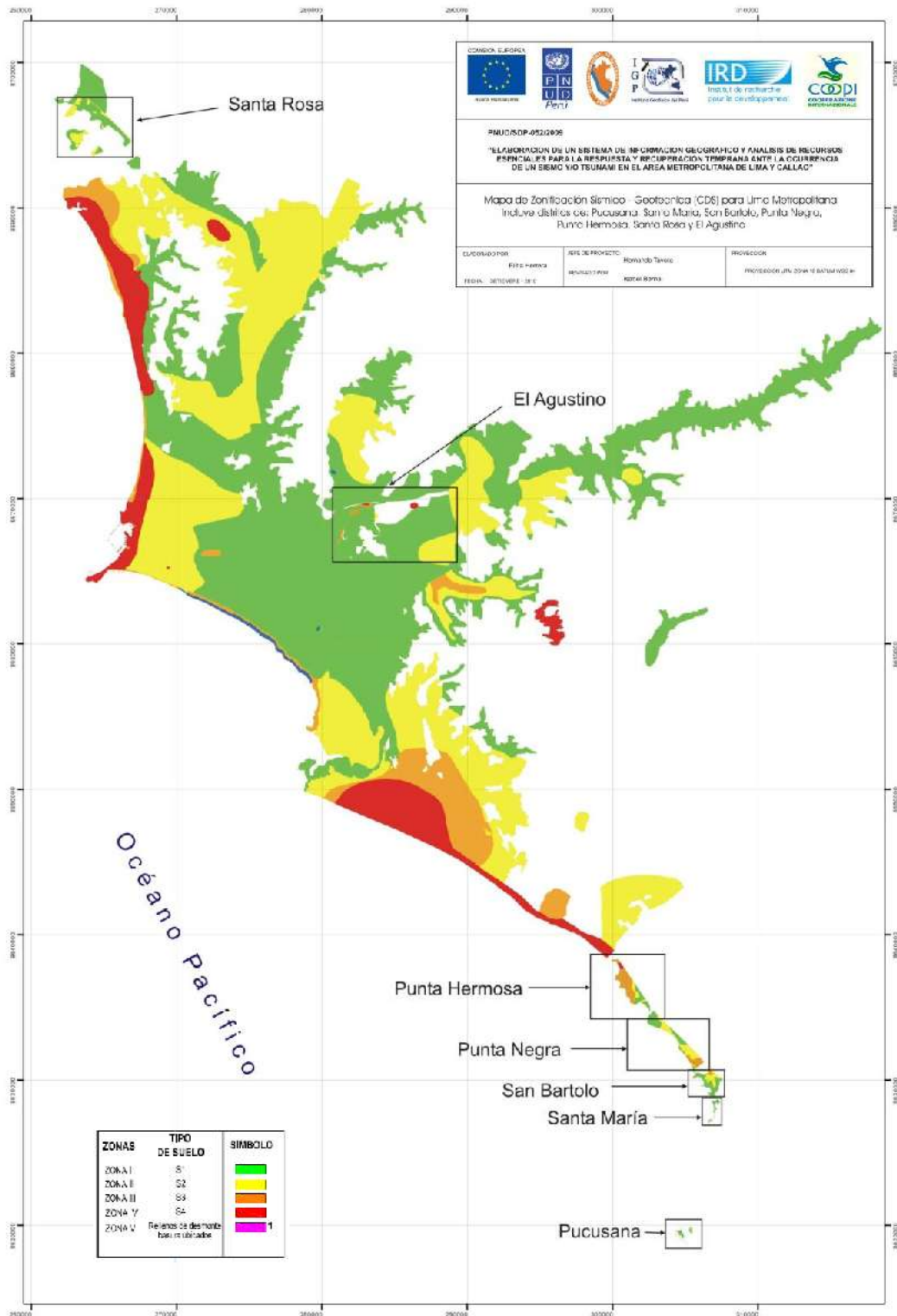


Figura 3: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica 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 Chala son presentados en este informe bajo el siguiente título: “**Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Chala**”.*

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 Chala se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Sismicidad

Se hace uso del Mapa Sísmico del Perú 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 sismogénicas definidas por el Instituto Geofísico del Perú (Tavera et al, 2012), las ecuaciones de atenuación propuestas por Young et al (1997) y Sadigh et al (1997), y el algoritmo CRISIS-2007 (Ordaz et al, 2007).

7.3.- Estudios 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 4). 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 4: Playas en la ciudad de Chala con acopio de población en las épocas de verano.

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 Chala 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 5).

En la Figura 6, 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 CH-110 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CH-27, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud (ruido), que al

momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.



Figura 5: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 7), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo

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

- .- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.*
- .- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.*
- .- Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de*

observación, considerando su respectiva desviación estándar (Figura 6). Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

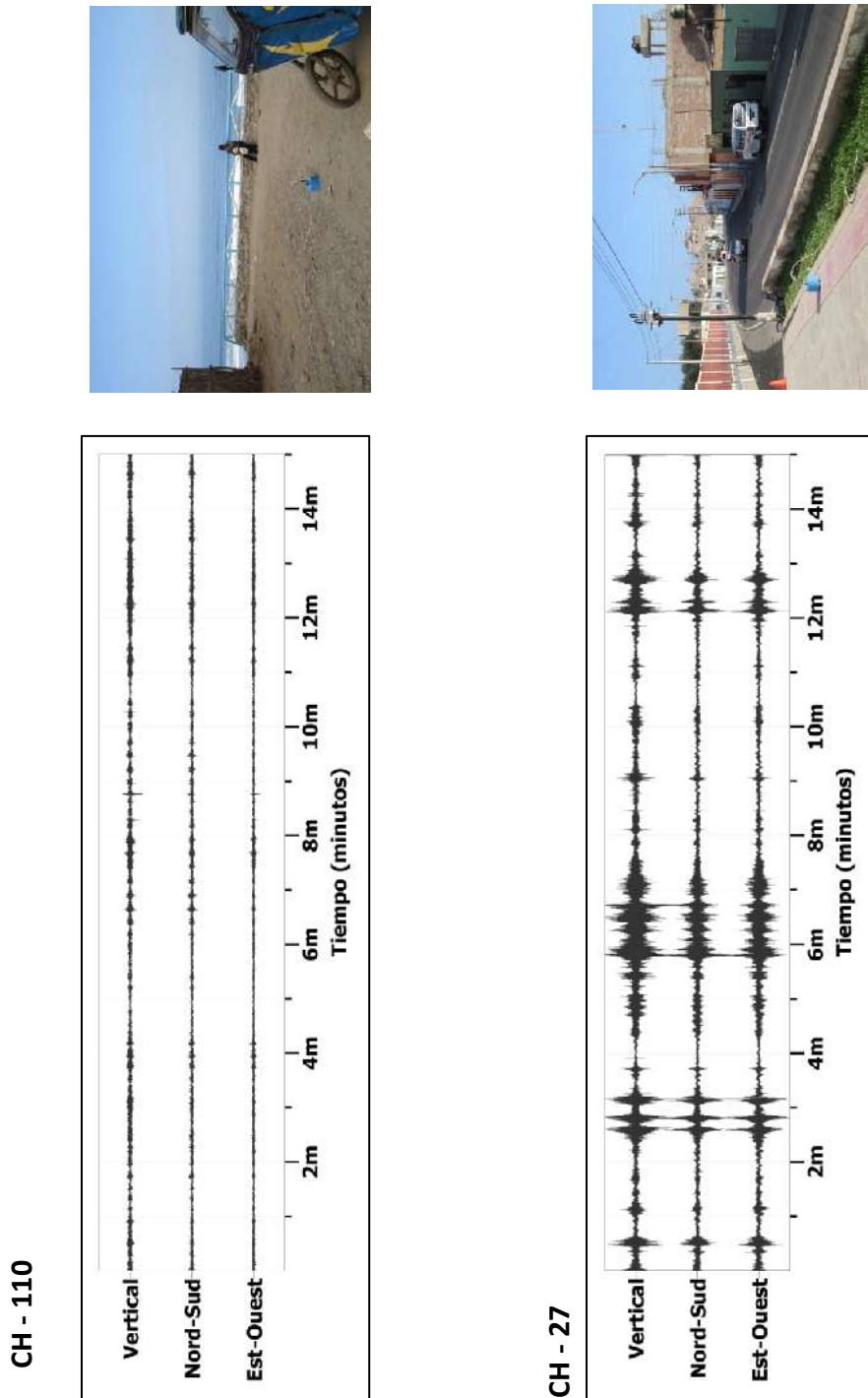
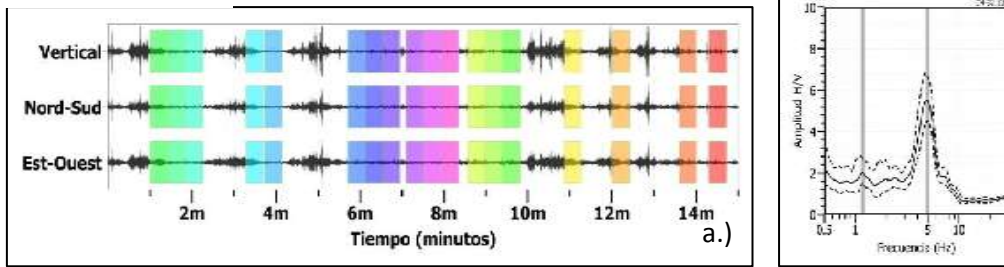


Figura 6: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre un punto de registro con presencia de ruido de fondo (CH-57) y otro con sin ruido (CH-110). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto..

CH-32



CH-52

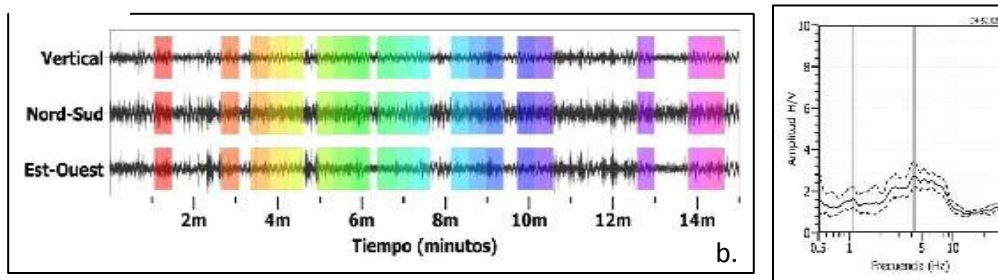


Figura 7: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. CH-32: Registros y razones H/V donde se identifica un pulso de frecuencia predominante, CH-52: Registros y razones H/V en los cuales la frecuencia predominante presenta baja amplitud o no está presente. 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 0.5 a 30 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 8). 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 8: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica en la ciudad de Chala

.- **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 9).

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.



Figura9: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos en la ciudad de Chala

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

8.1.- Sismicidad

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región sur presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Figura 10). Una de estas ciudades es Chala y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1913 (7.7Mw), 1942 (8.0Mw), 1996 (7.7Mw), 2001 (7.7Mw) y 2007 (7.5Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en sus construcciones precarias de adobe y quincha, además de algunos escenarios de licuación de suelos. Estos sismos causaron en la región sur del Perú intensidades del orden de IX-VIII en la escala de Mercalli Modificada (Silgado, 1978), tal como ocurrió con el sismo del año 2013.

El día 25 de setiembre del 2013 (Tavera et al, 2013), el borde occidental de la región sur del Perú fue afectado con la ocurrencia de un sismo de magnitud 7.0 Mw (magnitud momento) que produjo en el borde costero intensidades máximas de VI (MM), ver Figura 11. Este evento produjo daños mayores en las ciudades de Acari, Bella Unión, Yauca y Chala. El epicentro fue ubicado a 70 km en dirección oeste con respecto a la ciudad de Chala, produciendo daños en viviendas de adobe y rajaduras en los muros de un gran número de viviendas de material noble (Figura 12).

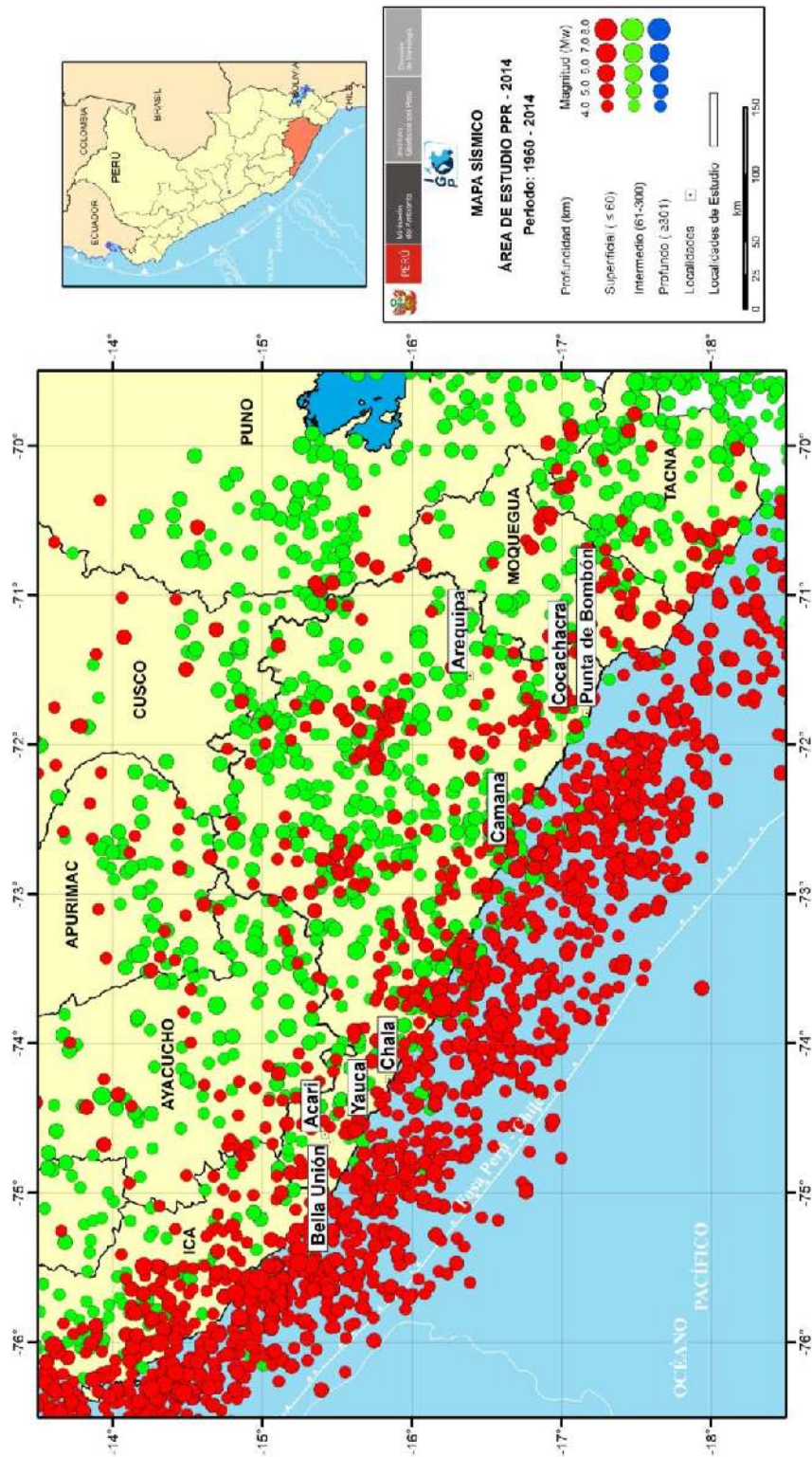


Figura 10: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región sur del Perú. Los círculos en rojo corresponden a sismos de foco superficial y los verdes, a sismos de foco intermedio.

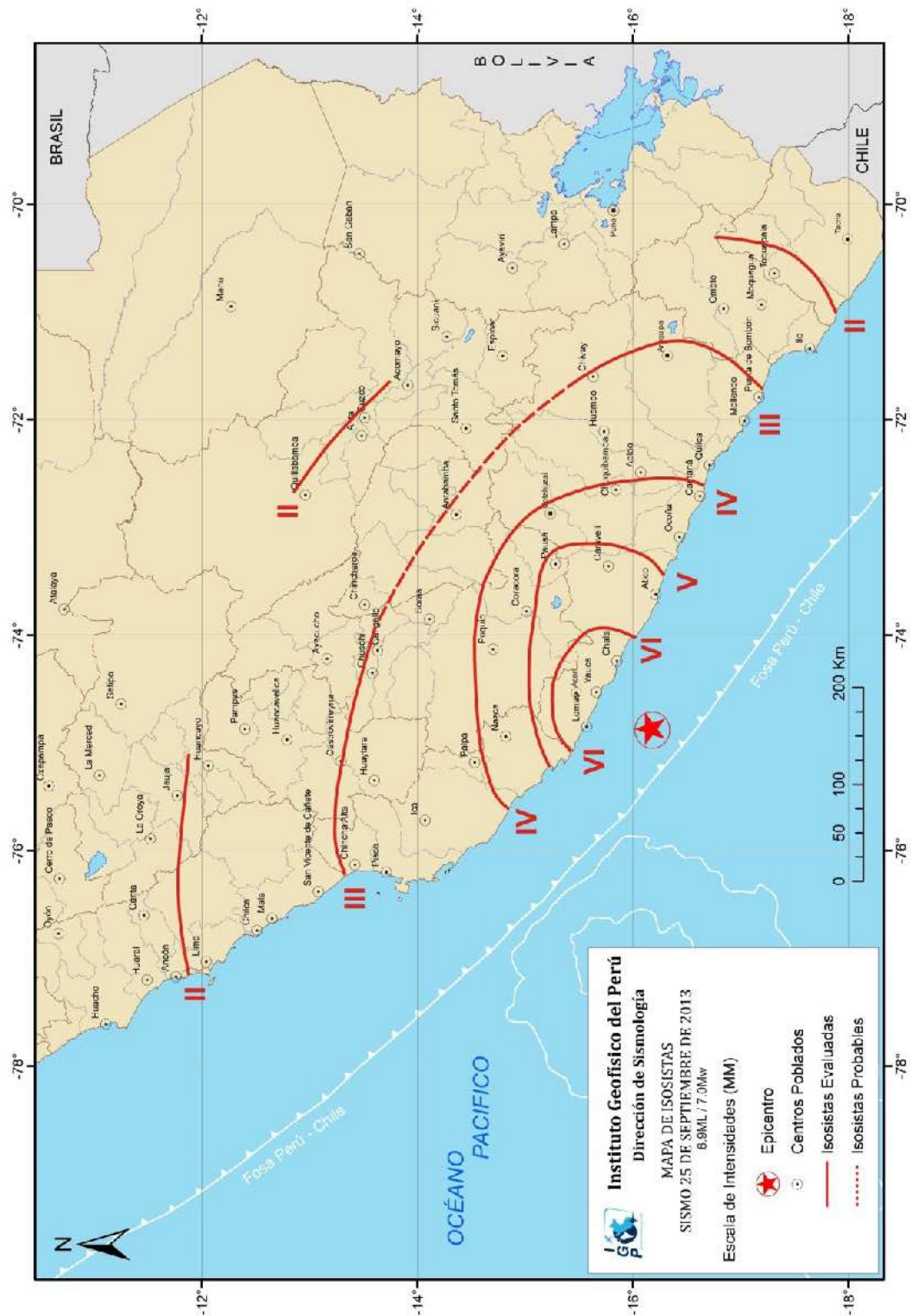


Figura 11: Mapa de intensidades macrosísmicas en la escala de Mercalli Modificada para el sismo ocurrido el 25 de septiembre de 2013. En la ciudad de Chala las intensidades fueron de VI (MM).



Figura 12: Imágenes de daños observados en las ciudades de Acarí, Bella Unión, Yauca y Chala debidos al sismo del 25 de setiembre de 2013.

Después de ocurrido el evento sísmico, se produjo hasta 20 réplicas con magnitudes menores a 4.5 ML, siendo al menos una de ellas percibida en la ciudad de Chala con intensidades del orden de III (MM). Por otro lado, al analizar la distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de 1966 (Nazca), 2001 (Arequipa) y 2007 (Pisco), se observa claramente que existe un área, con eje mayor del orden de 150 km paralelo a la línea de costa, que aún no experimenta ruptura y probablemente corresponda al sismo de 1913 (~8.0 Mw) que afecto toda esta región (Figura 13). De acuerdo al escenario descrito, el borde costero de la región sur y sobre todo, entre las localidades de Lomas y Chala, existe una alta probabilidad para la ocurrencia de un sismo con una magnitud ≥ 7 Mw, el mismo que causaría altos niveles de sacudimiento del suelo en toda la región.

Finalmente, en la Figura 14 se presenta el mapa de intensidades regionales para el periodo 1961 – 2014, llegándose a observar que la ciudad de Chala, 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.

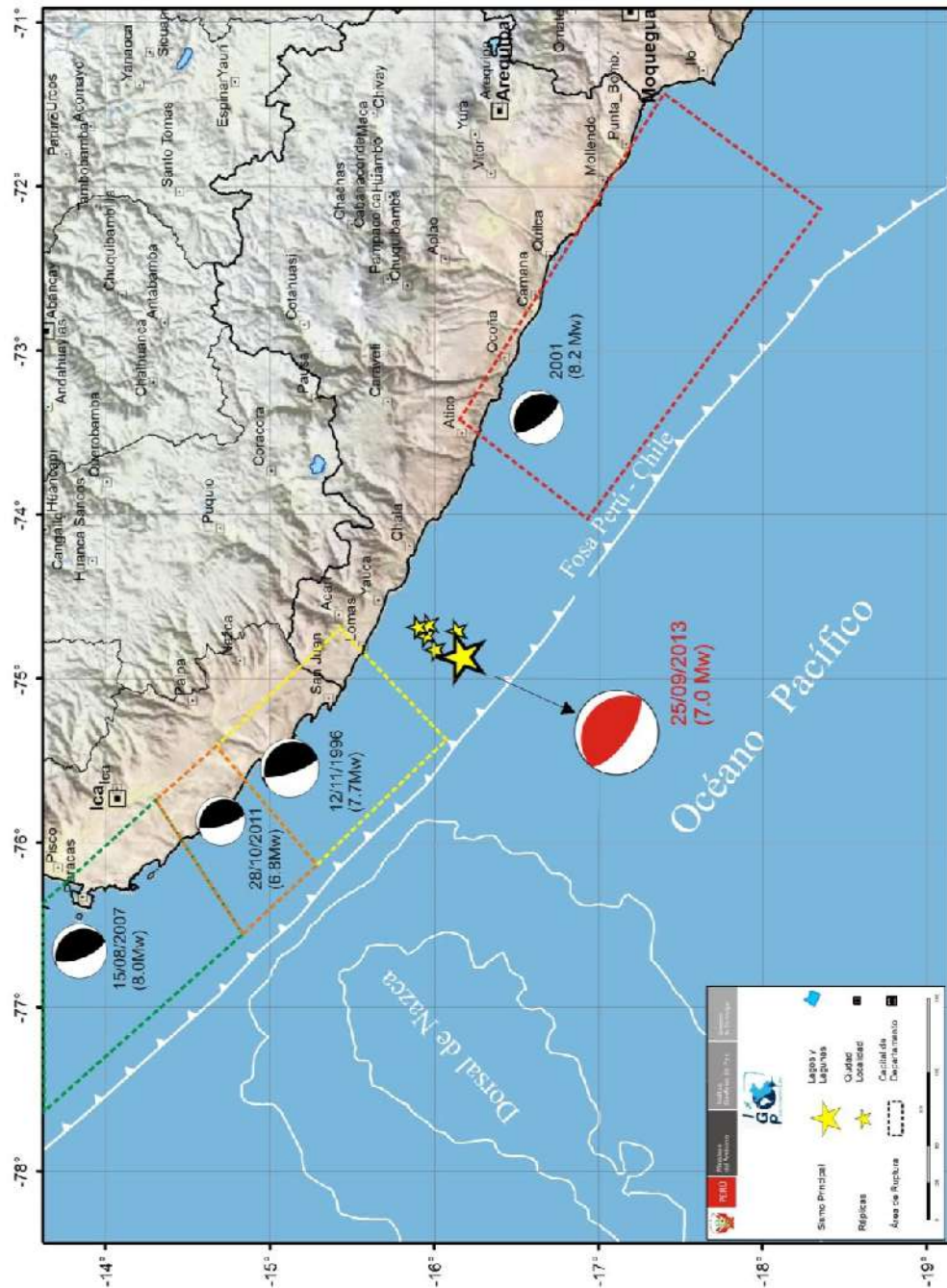


Figura 13: Distribución espacial de las áreas de ruptura de los sismos de Nazca-1996, Pisco-2007, Ica-2011, Arequipa-2001 y Yauca-Acarí del 25 de septiembre del 2013. Los mecanismos focales indican el desarrollo de similares procesos de ruptura. El área de ruptura asociada al sismo de 1913 (7.7Ms) estaría entre las áreas de los sismos de 1996 y 2001.

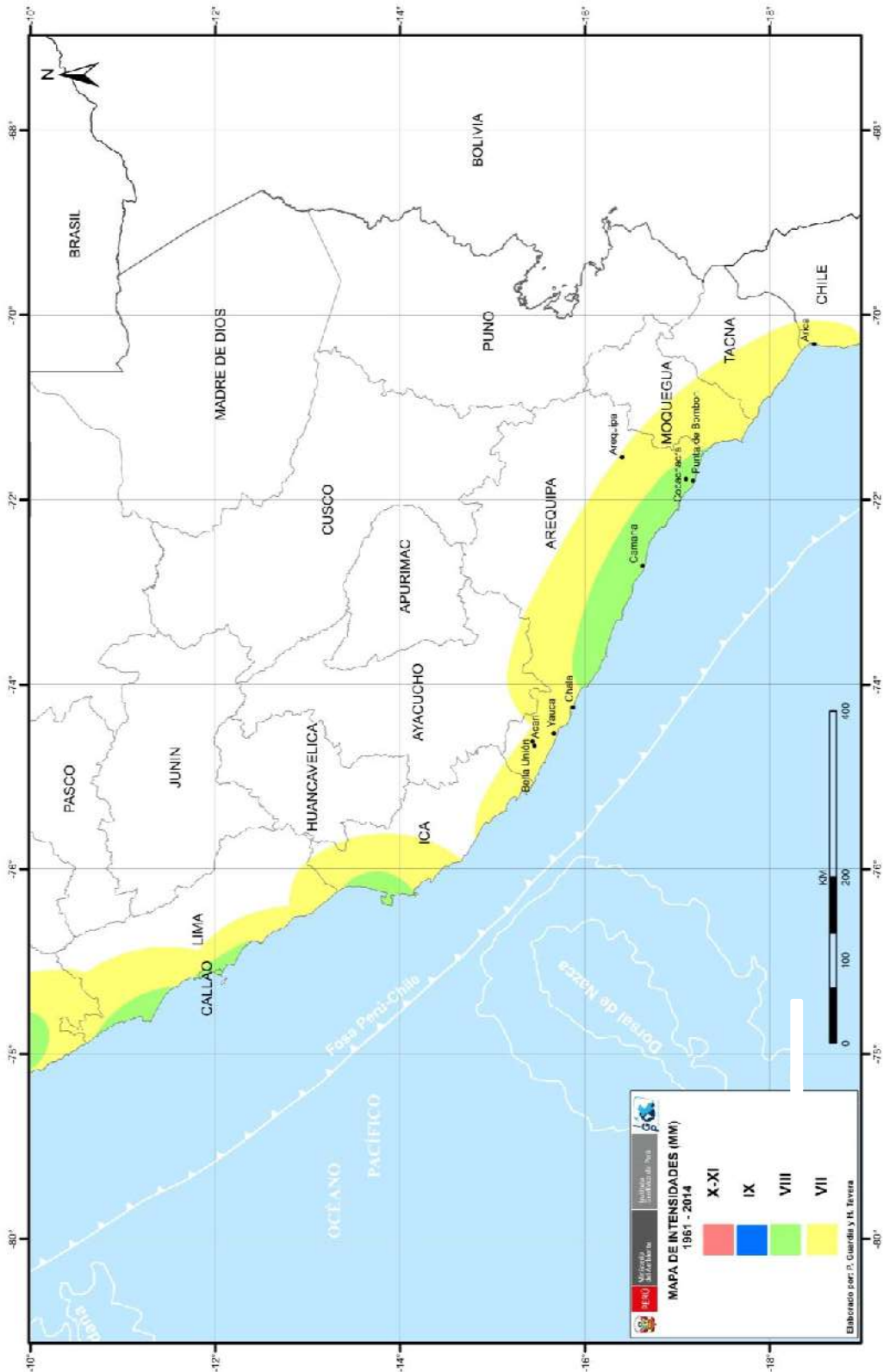


Figura 14: Mapa de intensidades máximas en la escala de Mercalli Modificada correspondientes a los sismos ocurridos en el borde occidental de la región sur del Perú entre los años 1961 y 2014.

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-2 asociada al sismo de 1913, tal vez el sismo mayor ocurrido en esta zona y que tiene alta probabilidad de repetirse con una magnitud igual o mayor a 7 Mw. 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.

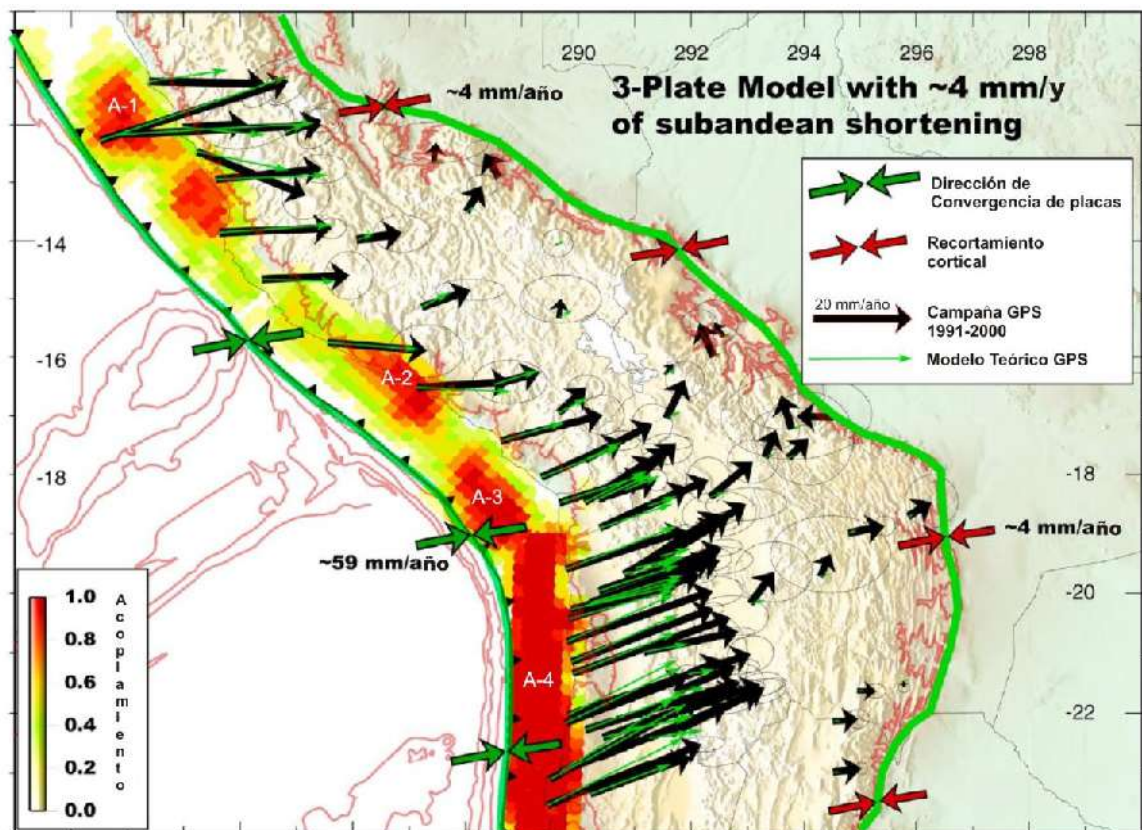


Figura 15: Mapa de asperezas y/o zonas de acoplamiento sísmico en el borde occidental de Perú-Chile obtenido a partir de datos de GPS y sísmicos. Las flechas negras corresponden a las medidas GPS in situ y las verdes a las obtenidas con el modelo teórico. La buena correlación sugiere la existencia de 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 Chala se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 500 a 520 gals (Figura 14), 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), Pisco 2007 (Tavera, 2008) y Acarí 2013 (Tavera et al, 2013).

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 (Silgado, 1978) y por lo general, 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 desde Pisco hasta Iquique en Chile, muriendo en Yauca y Chala hasta 30 personas, en Arica 100 y en Iquique unas 200. Según Silgado (1978), la tercera ola alcanzó alturas de 16 metros y movilizó corbetas tierra adentro hasta distancias de 300 metros. Por otro lado, los tsunamis producidos por los sismos de los años 1996, 2001 y 2007, produjeron localmente olas con alturas menores a 8 metros, no produciendo daños a distancias mayores, tal como es el caso de la ciudad de Chala. Sobre el sismo de 1913, con epicentro cerca de la ciudad de Chala, no existe mayor información sobre la generación de tsunamis que permita tener idea de los posibles escenarios presentados en la ciudad ante la ocurrencia de este peligro. Sin embargo, es de

interés generar escenarios para posibles tsunamis que pudieran afectar a la zona costera de la ciudad de Chala.

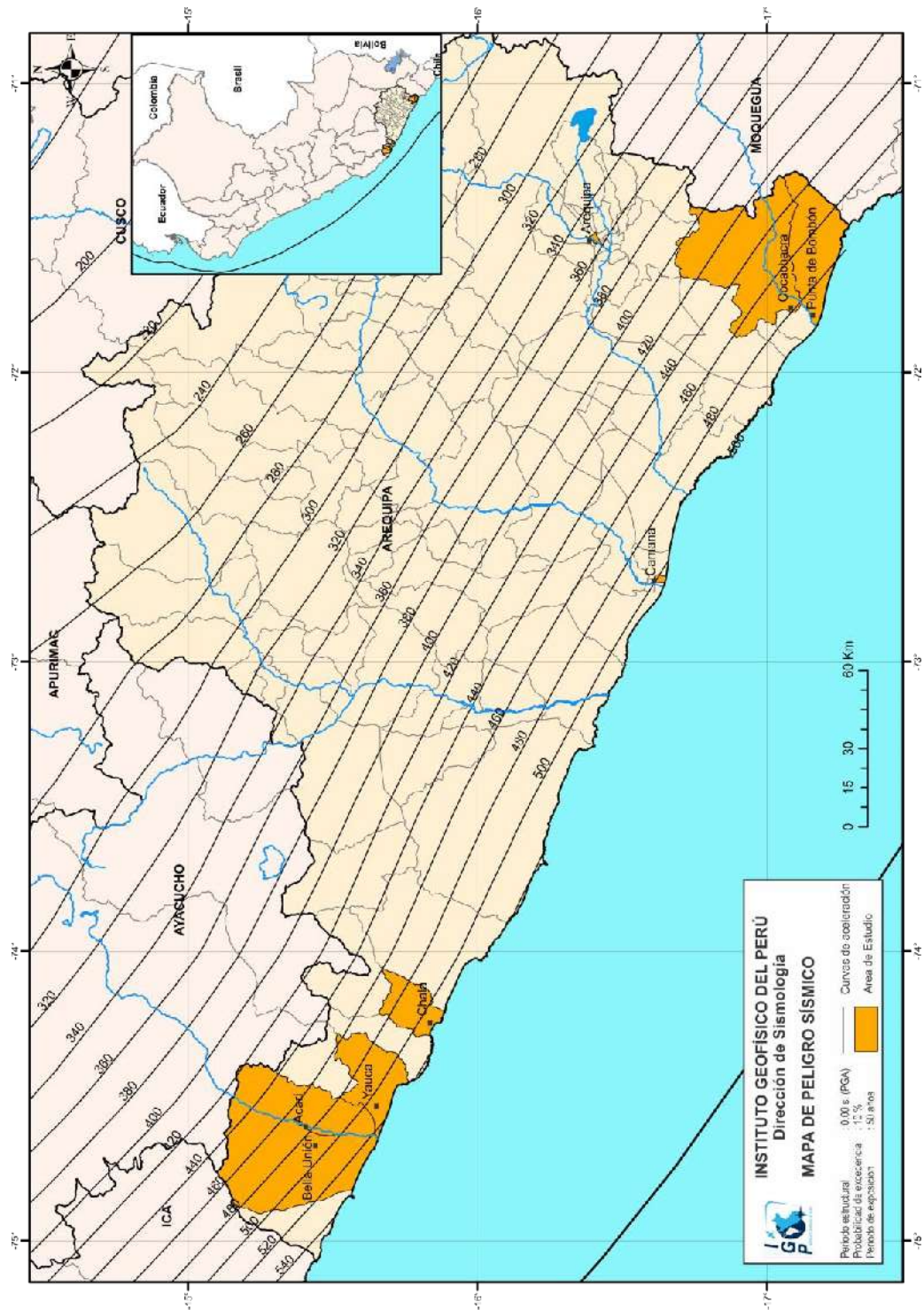


Figura 16: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región sur del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

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

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de la carta 314-315 adquirida en 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 y STRM, llegando a obtener 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 Chala y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del promedio de los valores correspondientes a los sismos ocurridos en los años 1996 (sismo de Nazca) y 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 asociados a las tres fases principales de un tsunami: generación, propagación e inundación. Para el modelado de tsunami se utiliza el algoritmo TUNAMI-N2, desarrollado por investigadores de la Universidad de Tohoku en Japón (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 en la zona costera de la ciudad de Chala, la primera ola llegaría en 16-18 minutos después de ocurrido el sismo y tendría una altura del orden de 11 metros, afectando áreas ubicadas entre Playa Grande y Playa Chica. 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 1. De acuerdo a estos

resultados, la mayor longitud de inundación se produciría a lo largo del río Chala y Playa Chala con volúmenes de agua que alcanzarían los 6.5 metros de altura. De acuerdo a las Figuras 17 y 18, el área urbana de la ciudad de Chala, podría no se afectada por el tsunami.

Tabla 1: Valores de longitud y altura de inundación por tsunami en la ciudad de Chala.

CHALA		
Áreas de interés	Altura de Inundación (m)	Longitud de Inundación (km)
Playa de la Caleta	4.5	0.3
Playa de la Aguadita	5.5	0.15
Playa Chala	6.5	0.5
Río Chala	6	0.45
Playa de Peña Colorada	6.5	0.1
Playa Grande	7	0.1
Playa Chica	6.5	0.1
Puerto Chala	6.5	0.1

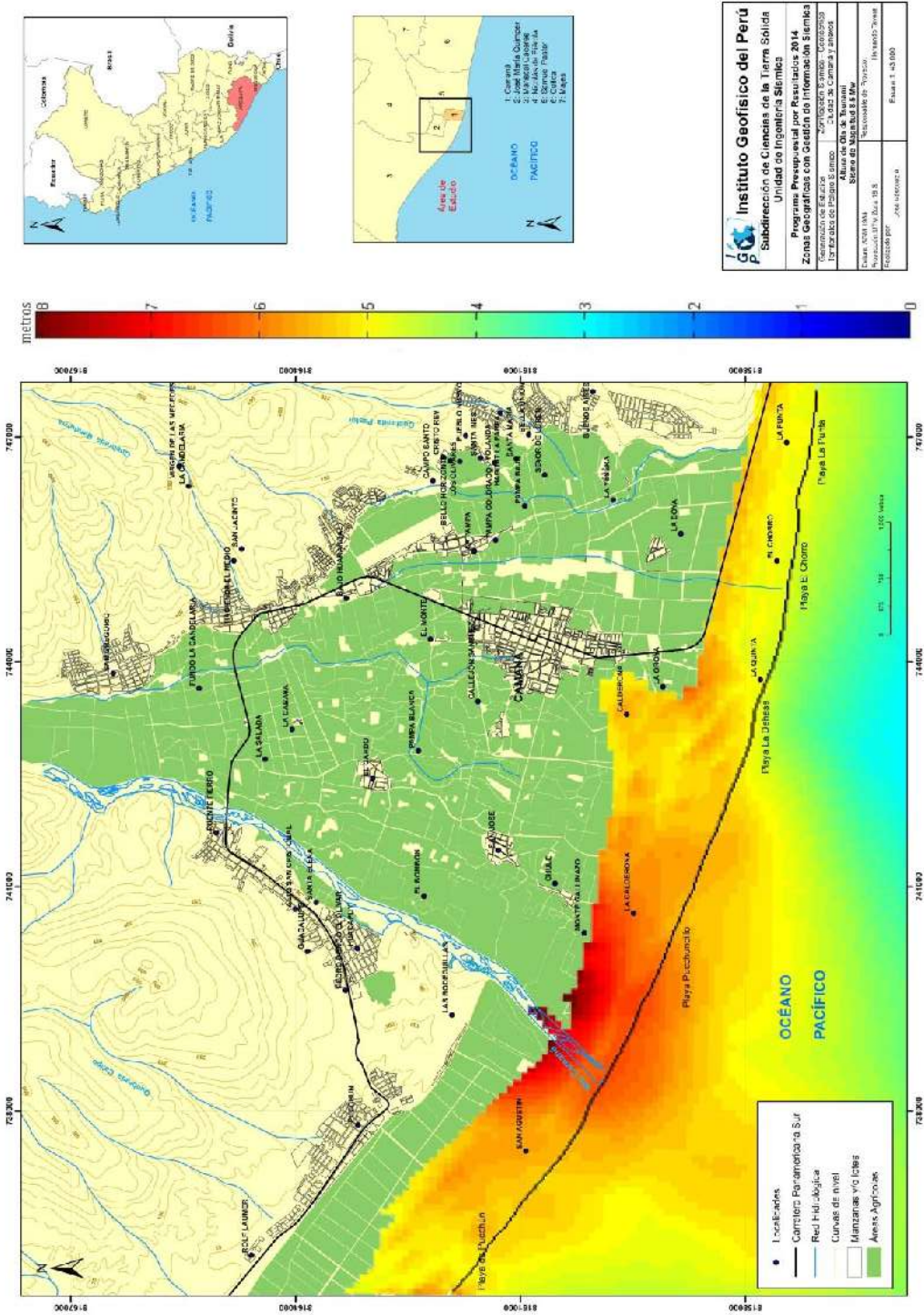


Figura 17: Mapa de niveles de altura de inundación en la zona costera de la ciudad de Chala



Figura 18: Mapa de niveles de inundación horizontal por tsunami en la zona costera de la ciudad de Chala

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

9.1. Geomorfología

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

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

El modelo digital del terreno (MDT), representa a una superficie en 3D construida con la base topográfica digital a escala 1:5000, resolución espacial de 5 metros y referenciada al geoide WGS84/EGM96 (Zona 18S). La topografía se obtuvo a partir de la restitución aerofotogramétrica de fotografías aéreas de los años 1975 a 1990 a escala 1:15000. En la Figura 19 se presenta el mapa MDT elaborado a escala gráfica de 1:5000 y ella muestra que el área urbana de la ciudad de Chala se asienta sobre terrazas aluvionales que presentan en promedio cotas entre 25 y 100 m.s.n.m.

Por otro lado, el plano de pendientes representa los diferentes grados de desnivel del terreno; es decir, identifica las geoformas del terreno en base a la inclinación de las distintas unidades geomorfológicas. El mapa se obtiene en base a la aplicación de la subrutina SPATIAL ANALYST del software Arcgis que usa el archivo fuente de MDT (Figura 20). En las inmediaciones del área urbana de la ciudad de Chala se ha identificado el predominio de pendientes menores a 15°, propios de terrazas aluvionales; mientras que, en los alrededores las quebradas se encuentran sobre superficies con 30° de pendientes.

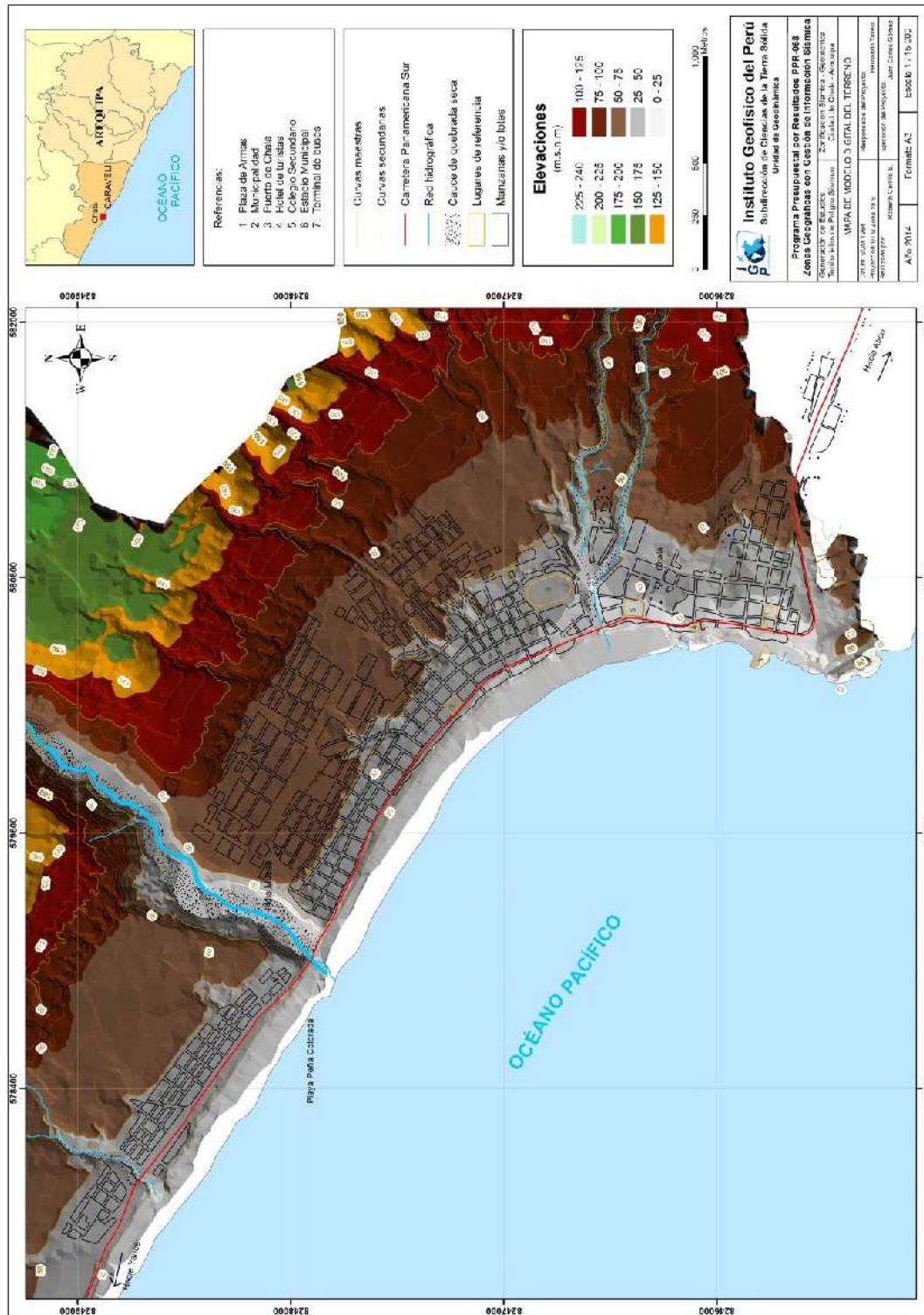


Figura 19: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para la ciudad de Chala y alrededores

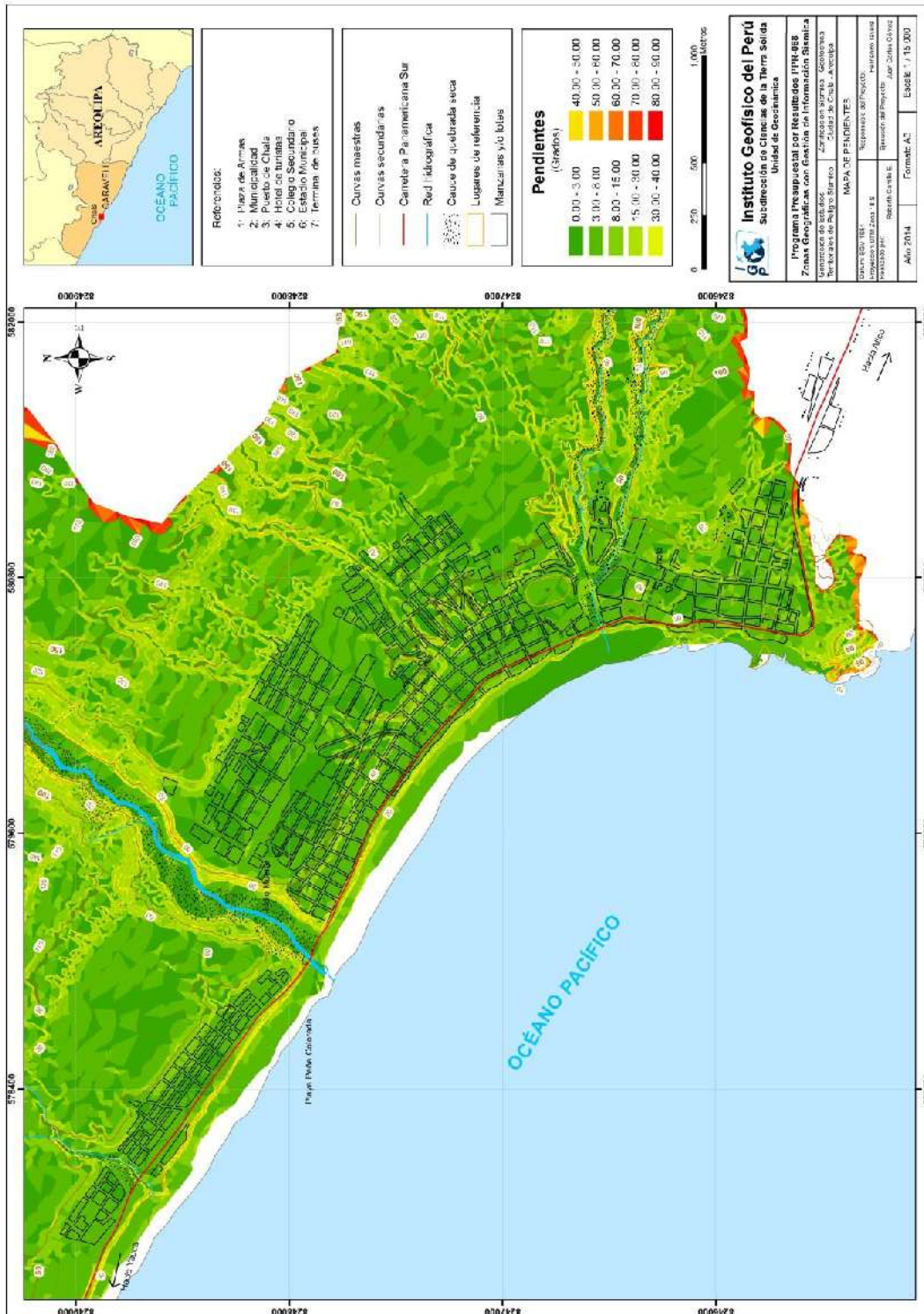


Figura 20: Mapa de pendientes para la ciudad de Chala y alrededores

9.1.1. Unidades Geomorfológicas

En el área sobre la cual se emplaza la ciudad de Chala se ha identificado la existencia de 2 unidades geomorfológicas y sus principales características se describen a continuación (Figura 21):

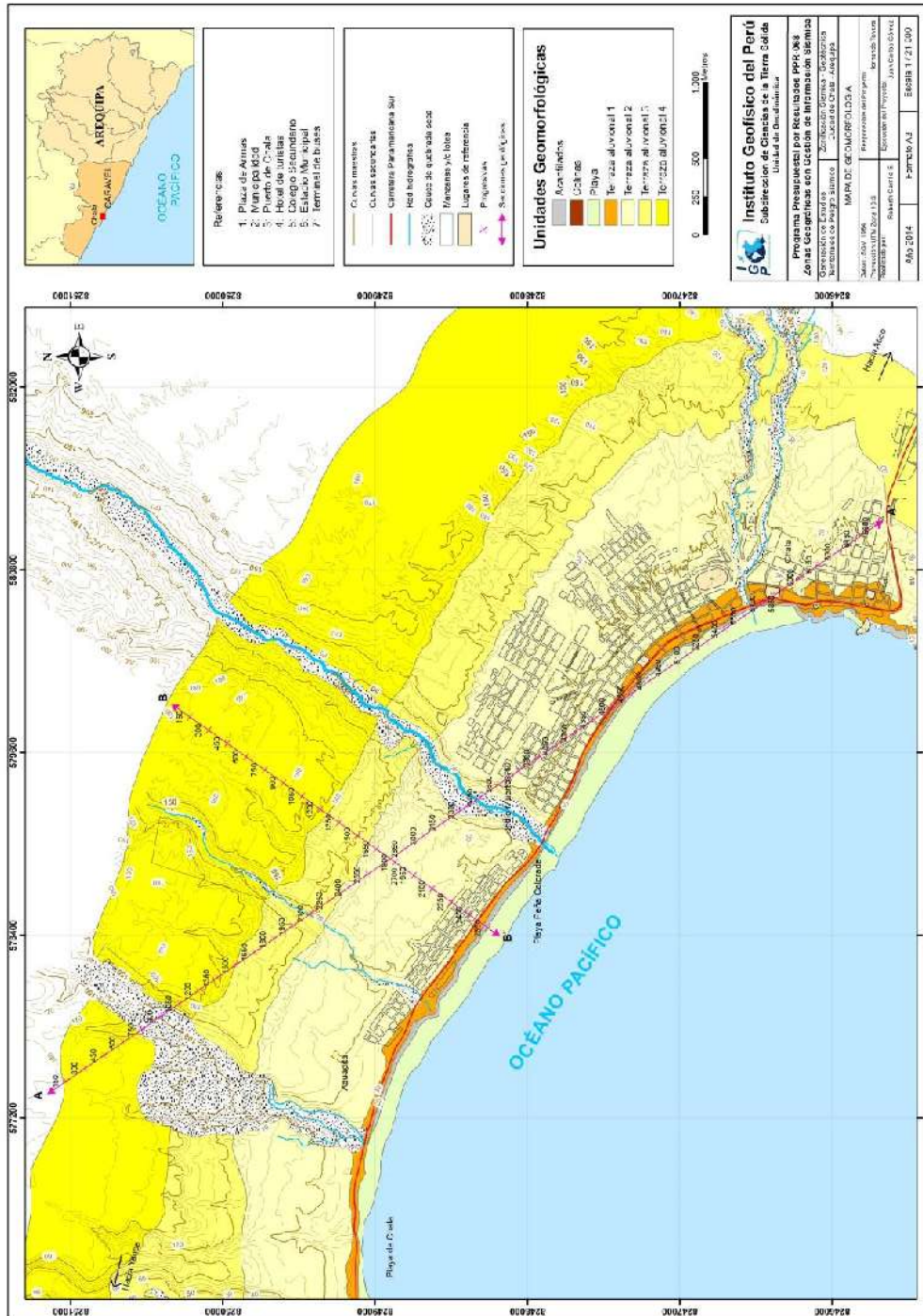


Figura 21 Mapa geomorfológico de la ciudad de Chala y alrededores

9.1.1.1.- Modelado Marino

La ciudad de Chala se asienta sobre terrazas aluvionales que se encuentran conformadas por materiales heterogéneos (bloques, cantos y clastos subredondeados envueltos en una matriz arenosa). Estas geoformas han sido generadas por el aporte de materiales provenientes de procesos de erosión de rocas preexistentes y luego trasladados, desde el extremo NE de la ciudad, para ser depositados en las inmediaciones del área urbana de Chala. Como parte de este grupo se ha considerado la unidad geomorfológica playa que resulta de la acumulación de material fino acumulado en el litoral. A continuación, se describen las unidades reconocidas en campo:

.- Terrazas aluvionales: Son geoformas semiplanas o levemente inclinadas que han sido modeladas por la dinámica aluvial de la zona (quebradas). Generalmente, están cubiertas por material heterogéneo mal gradado como arenas finas, gravas y bloques redondeados que se encuentran en las inmediaciones de la zona urbana de Chala (Figura 22). En la zona de estudio se ha identificado hasta cuatro terrazas aluvionales diferenciadas por el desnivel topográfico que presentan.



Figura 22: Terraza aluvional sobre el cual se asienta el área urbana de la ciudad de Chala.

*.- **Playa:** Son acumulaciones de arena fina situadas en el borde costero, se presentan como franjas estrechas generadas por el oleaje (erosión marina) y la acción eólica. El transporte de los sedimentos hacia la zona de playa, puede ser de origen: fluvial, erosión de los acantilados, sedimentos de fondo marino y eólico, a los que se adiciona los resultantes de actividades antrópicas. Esta unidad geomorfológica se encuentra en el extremo Sur-Oeste de la ciudad de Chala, formando un antearco. En la playa de Chala desembocan principalmente cuatro quebradas en dirección NE-SO, estas transportan materiales aluviales que se depositan en el litoral, Figura 23.*



Figura 23: Zona de playa presente en el extremo suroeste de la ciudad de Chala. La zona de playa presenta una longitud de 4 km y ancho de 130 metros.

9.1.1.2.- Origen Tectónico

Las geoformas de importancia son las que se encuentran vinculadas al levantamiento de la Cordillera de la Costa, las mismas que generalmente presentan poca elevación y forman colinas constituidas por rocas volcánicas correspondientes a la Formación Chocolate. En el caso de los acantilados, son formados por los factores antes mencionados, así como por los procesos erosivos de origen marino.

.- **Colinas:** Son geoformas de poca elevación y de forma cónica que se encuentran en el extremo sur de la ciudad de Chala con desniveles de hasta 25 m. La morfología es ondulada y la pendiente de las laderas no sobrepasa los 30° de inclinación. Generalmente, están cubiertas por rocas volcánicas de la Formación Chocolate. Se han formado como producto de la acumulación de derrames lávicos, Figura 24.



Figura 24: Colina ubicada en el extremo sur de la ciudad de Chala con una cota de 75 m.s.n.m. y desnivel de 25 metros..

.- **Acantilados:** Esta unidad geomorfológica se caracteriza por presentar desniveles topográficos y pendientes que varían entre 45° y 90°. Se encuentran conformados por materiales aluviales, constituidos por conglomerados y niveles de material fino. Estos acantilados se encuentran a lo largo de la zona urbana del distrito de Chala, siguiendo la línea de costa, abarca una extensión de 5 km aproximadamente, desde el puerto del distrito de Chala hasta las inmediaciones del sector Aguadita. Entre los acantilados de Chala y el terraplén (playa), existe un desnivel de 10 - 15 m aproximadamente, Figura 25



Figura 25: Acantilado con pendiente de hasta 90°, sobre ellos se asientan algunas viviendas.

9.2.- Geología

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

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

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

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






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

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

9.2.1- Geología Regional

La información geológica regional para el distrito de Chala fue publicada por el INGEMMET (Boletín N° 34: Cuadrángulo Geológico de Chala, Hoja: 32-ñ, a escala 1/100,000), y se indica que las unidades litológicas aflorantes consisten en rocas del Mesozoico Inferior conformadas por brechas volcánicas y lavas andesíticas de color marrón, pertenecientes a la Formación Chocolate. Estas unidades constituyen el substrato rocoso de la zona de estudio y sobre el cual, suprayace la Formación Pisco del Mioceno, conformado por areniscas de grano fino y arcillas. En la parte superior del Cenozoico, específicamente en el Cuaternario se encuentran los depósitos aluvionales, marinos y aluviales (Tabla 2).

Tabla 2: Columna cronolitoestratigráfica de las unidades aflorantes en la ciudad de Chala

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Marinos Qr-m  Dep. Aluviales Qh-al 
		Pleistoceno	Dep. Aluvionales Qh-alu 
	NEÓGENO	Plioceno	
		Mioceno	Fm. Pisco Nm-pi 
	MESOZOICO	CRETÁCEO	Superior
Inferior			
JURÁSICO		Medio	
		Inferior	Fm. Chocolate Ji-cho 

9.2.2- Geología Local

Para la elaboración del mapa geológico local se ha considerado la recopilación de la información publicada por INGEMMET (Caldas, 1998), mapas geológicos y estudios neotectónicos. Posteriormente, en campo se realizó el reconocimiento y delimitación de las principales unidades geológicas aflorantes en el distrito de Chala. Finalmente, se obtiene el mapa geológico a escala 1:20000 (Figura 26) y cuya información permite identificar las siguientes unidades geológicas:

.- **Formación Chocolate (Ji-cho):** Unidad litológica del Jurásico Inferior, constituida por brechas volcánicas y lavas andesíticas de color marrón, con presencia de niveles de cuarcitas y calizas. Se encuentran aflorando a 200 metros al Sur del estadio municipal de la ciudad de Chala, Figura 27.



Figura 27: Materiales volcánicos (lavas) ubicadas a 200 metros al sur de la ciudad de Chala..

.- Formación Pisco (Nm-pi): La unidad se encuentra suprayaciendo en discordancia angular a la Formación Chocolate. Está conformada por areniscas de grano fino, arcillas y limolitas de color blanquecino y amarillo. Aflora en las inmediaciones de la quebrada Huanca (sector Aguadita); además, de afloramientos pequeños y dispersos en los alrededores del distrito de Chala (Figura 28).



Figura 28: Limolitas de color crema mezcladas con capas de arena de grano fino. Se presentan compactas y se encuentran a 550 metros al norte del estadio municipal de la ciudad de Chala.

- Depósitos Cuaternarios: Considera a todos los materiales que se han formado en los últimos 2.5 millones de años y entre ellos se tiene a lo siguiente:

Depósitos Aluvionales (Qh-alu): Considera a todos los materiales resultantes de los procesos de erosión ocurridos en quebradas y se encuentran vinculados a la presencia de aluviones. Estos son transportados aguas abajo y depositados a lo largo de la ciudad de Chala conformando una serie de terrazas. Esta unidad pertenece al Cuaternario (Pleistoceno) y está constituida por materiales granulares heterogéneos, como gravas y bloques redondeados que se encuentran envueltos en una matriz arenosa no plástica. Sobre esta unidad se encuentra asentada la zona urbana de la ciudad de Chala (Figuras 29 y 30). En el distrito de Chala, estos depósitos aluvionales conforman hasta cuatro terrazas que se diferencian por el desnivel que presentan entre ellos.



Figura 29: Terraza aluvional ubicada en la Panamericana Sur, sector Aguadita. Sobre estos materiales se asientan viviendas.

Depósitos Aluviales (Qh-al): Materiales resultantes de los procesos de erosión vinculados a las torrenteras, quebradas, etc. Son transportados aguas abajo y depositados en zonas bajas. Esta unidad pertenece al Cuaternario (Holoceno) y está conformada por arenas y gravas transportadas a través de las quebradas Chala, Cementerio y Huanca (Figura 31).



Figura 30: Material aluvional ubicado a 300 metros al norte del sector Indio Muerto.



Figura 31: Depósito aluvial ubicado en la desembocadura de la quebrada Chala. Está confirmado por gravas subredondeadas a redondeadas.

Depósitos Marinos (Qr-m): Se han originado a lo largo del litoral como producto del transporte eólico y la energía generada por las corrientes de agua (olas), transportando y arrastrando partículas de arena fina hasta la

playa. Estos materiales se encuentran a lo largo de la playa de Chala, tal como se observa en la Figura 32.



Figura 32: Depósitos marinos conformados por arenas distribuidos en la playa de la ciudad de Chala.

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, 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 Chala (Figura 33).

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 Chala, 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 Chala y alrededores, ha permitido identificar tres tipos de eventos, siendo sus características las siguientes:

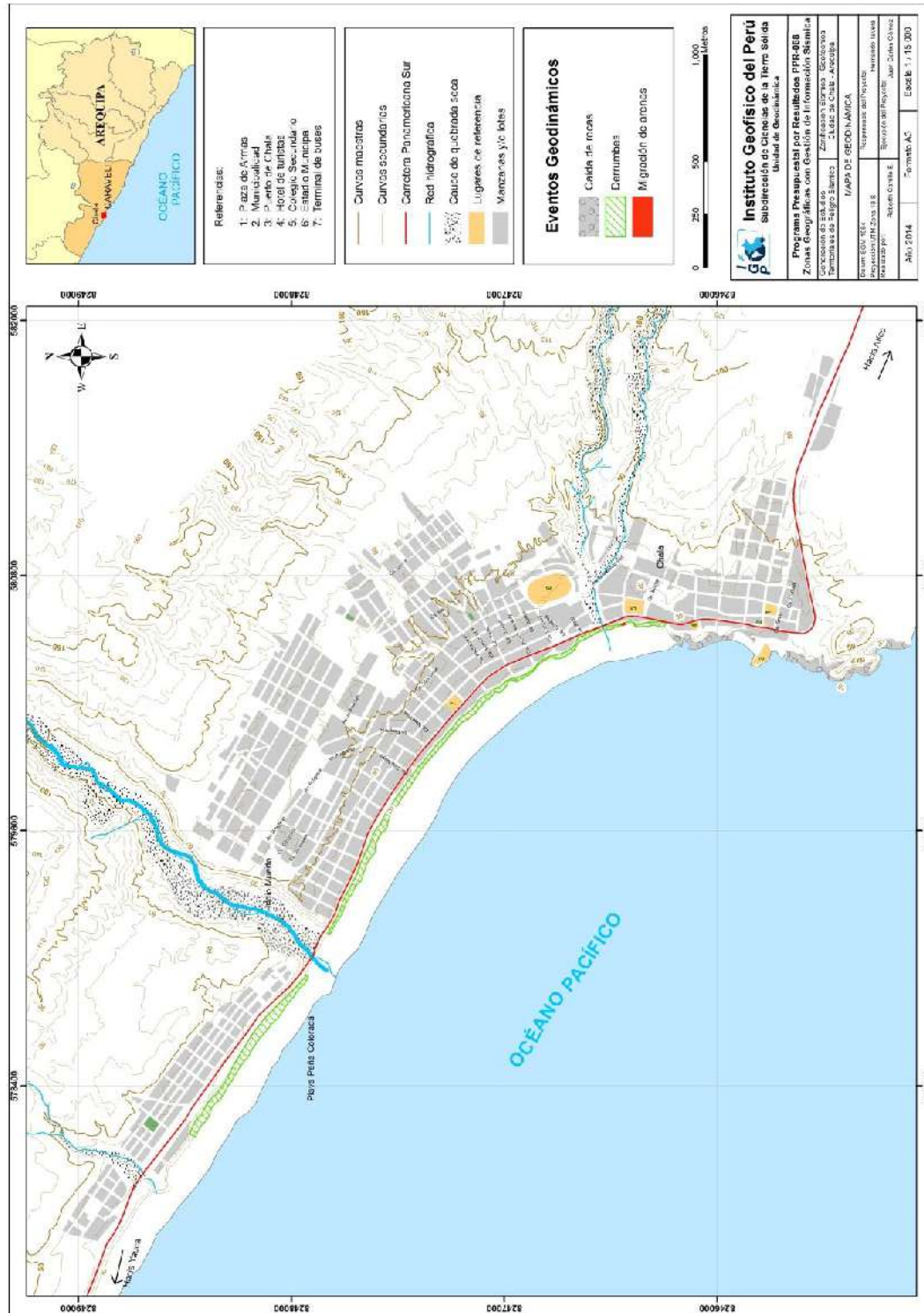


Figura 33: Mapa geodinámico de la ciudad de Chala y alrededores

.- Migración de arenas: Considera procesos ligados a la dinámica eólica principalmente marina y consiste en el traslado e invasión de arena al continente y al litoral. En el extremo sur de la ciudad de Chala se ha evidenciado la presencia de un depósito eólico que se encuentra debajo del acantilado dentro de la zona de playa (Figura 34).



Figura 34: Migración de arena con 7 metros de altitud en la playa Chala (extremo sur de la ciudad)

.- Caída de Rocas: Representan a eventos ligados a la dinámica marina y consiste en el desgaste de las rocas ubicadas en el límite costero debido a las olas, mareas y corrientes que golpean a los afloramientos que conforman los acantilados del litoral. En la ciudad de Chala, los acantilados ubicados en el extremo sur del muelle del distrito se encuentran afectados por procesos de erosión marina que han generado la caída de fragmentos de roca (Figuras 35 y 36). Sobre estas rocas de origen volcánico, principalmente de la Formación Chocolate, se encuentran asentadas zonas urbanas y lugares turísticos.

.- Derrumbes: Los acantilados ubicados en las inmediaciones de la ciudad de Chala, se encuentran conformados por materiales semicompactos de moderada cohesión y sujetos a procesos de erosión producto de la acción de los distintos agentes de geodinámica superficial (viento, vibraciones en el suelo, corrientes de agua, etc.), así como de la acción antrópica. Estos acantilados presentan pendientes verticales (90°) a semivertical y están compuestos por material de relleno, sobre los cuales se asientan viviendas y lugares comerciales. En

general, estos acantilados vienen siendo afectados por derrumbes de clastos y materiales sueltos (arenas) y que podrían afectar su estabilidad física y por ende las viviendas ubicadas sobre estos (Figuras 37 y 38).



Figura 35: Acantilados afectados por procesos de erosión marina que causan la caída de rocas. Extremo sur del muelle de Chala.



Figura 36: Caída de rocas que afectan el sector sur de la ciudad de Chala. Sobre este acantilado se encuentra el Hotel de Turistas.



Figura 37: Viviendas ubicadas sobre acantilados verticales constituidos por arenas y limos; por lo tanto, se encuentran expuestos a peligro inminente.



Figura 38: Viviendas situados sobre los acantilados de Chala

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 Chala se recolectó información según las siguientes técnicas:

.- Exploraciones a cielo abierto (calicatas, Norma ASTM D420): En la ciudad de Chala se construyeron 9 calicatas (Tabla 3 y Figura 39), siendo la profundidad máxima de observación del orden de 3.4 metros y la mínima de 1.2 metros (ver Anexos). La profundidad varía porque en algunos suelos se encontró materiales muy compactos y difíciles de escavar como caliches.

Tabla 3: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)	SUCS
CHA-01	580955	8245953	45	1.20	SM
CHA-02	580777	8246514	27	3.20	SP
CHA-03	580669	8246885	32	2.90	GP
CHA-04	580926	8247279	60	2.60	GM
CHA-05	580598	8247587	60	2.80	SP
CHA-06	579711	8247641	35	3.30	SP
CHA-07	579850	8248133	67	2.80	GW
CHA-08	578709	8248347	36	3.40	GP
CHA-09	577851	8248926	36	3.15	GP

.- 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 4 se presente los resultados obtenidos en cada punto de observación.

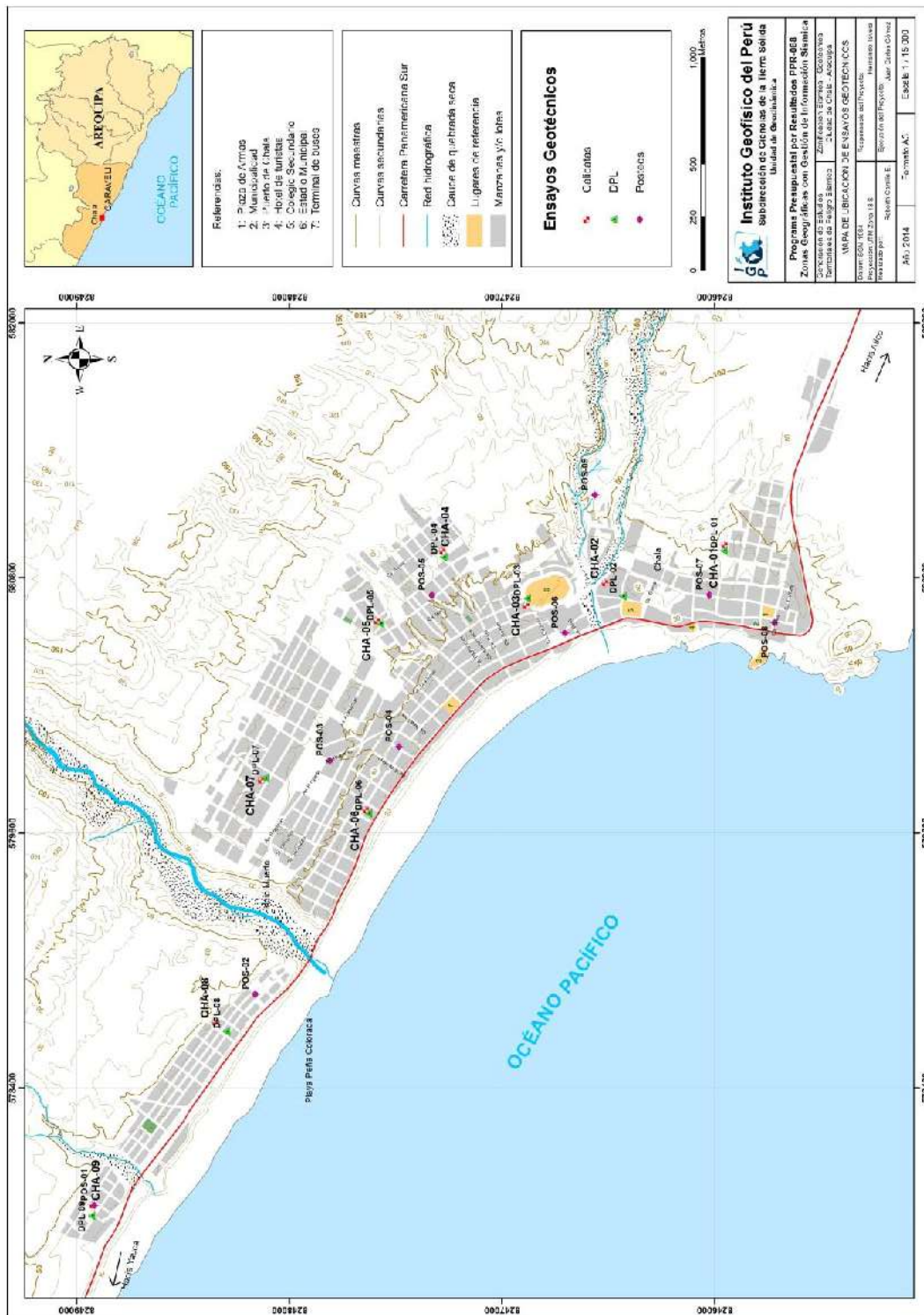


Figura 39: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Chala

- Exploración con posteadora manual (Norma ASTM D1452): A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 9 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Tabla 5), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 0.5 metros (suelos granulares) y la mínima de 0.12 metros (ver Anexos). 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 Chala.

Tabla 4: Valores de densidades de suelo in situ obtenidas para la ciudad de Chala

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	DENSIDAD HUMEDAD (gr/cm ³)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
CHA-01	1.20	1.58	1.55
CHA-02	3.20	1.64	1.63
CHA-03	2.90	1.83	1.75
CHA-04	0.90	1.78	1.76
CHA-05	2.80	1.42	1.41
CHA-06	3.30	1.77	1.75
CHA-07	2.80	1.81	1.78
CHA-08	3.40	1.92	1.91
CHA-09	3.10	2.15	2.14

Tabla 5: Coordenadas UTM para la identificación de los posteos en la ciudad de Chala

POSTEO	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)	ELEVACIÓN (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
POS-01	577848	8248918	35	0.12
POS-02	578842	8248160	35	0.25
POS-03	579942	8247810	53	0.30
POS-04	580007	8247485	34	0.12
POS-05	580719	8247330	55	0.50
POS-06	580541	8246705	20	0.20
POS-07	580721	8246024	26	0.45
POS-08	580591	8245718	15	0.20
POS-09	581191	8246564	55	0.50

- Ensayo de penetración dinámica ligera (DPL, Norma DIN4094): Se procedió a estimar la resistencia del suelo al hincado del cono dinámico en 8 puntos dentro de la ciudad de Chala (Tabla 6). Estos ensayos se realizaron hasta una profundidad máxima de 0.74 metros y mínima de 0.06 metros debido a que los suelos están conformados por gravas y arenas bien gradadas que presentan ángulos de fricción promedio de 27° a 41°, característico de suelos granulares con resistencia al corte favorable para el diseño de cimentaciones (ver Anexos).

Tabla 6: 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	580926	8245957	45	0.74
DPL-02	580711	8246433	27	0.50
DPL-03	580701	8246908	33	0.66
DPL-04	580896	8247275	55	0.57
DPL-05	580583	8247753	60	0.13
DPL-06	579690	8247629	35	0.06
DPL-07	579856	8248115	67	0.15
DPL-08	578664	8248296	33	0.20
DPL-09	577798	8248931	35	0.40

- 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 7. En general, los resultados muestran que los suelos de la ciudad de Chala presentan cohesión menor a 0.10 Tn/m^2 ; mientras que, los ángulos de fricción interna se encuentran entre 31° y 37°, propios de arenas sueltas bien graduadas con contenidos de gravas.

10.1.- Capacidad de Carga Admisible

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad de carga admisible. De los ensayos de corte directo se hace uso los datos del ángulo de fricción y la cohesión a fin de calcular la capacidad de carga última de los suelos, considerando el factor de seguridad de 1/3 definida en la Norma Técnica Peruana para el diseño de cimentaciones. En el caso de la ciudad de Chala, 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 8). La

clasificación de los suelos se realiza en base a la Tabla 9 y los resultados de muestran en la Figura 40.

Tabla 7: Valores obtenidos para el ensayo de corte directo en la ciudad de Chala

MUESTRA	Ángulo de fricción interna del suelo (°)	Cohesión aparente del suelo (Tn/m ²)	Densidad natural (gr/cm ³)
CHA-01	31.20	0.10	--
CHA-02	33.30	0.10	--
CHA-03	36.83	0.00	1.89
CHA-04	36.24	0.00	1.87
CHA-05	28.80	0.10	--
CHA-06	31.80	0.10	--
CHA-07	36.22	0.00	1.91
CHA-08	36.61	0.00	1.92
CHA-09	37.31	0.00	1.95

Según estos resultados, se determina que el extremo norte del estadio municipal presenta capacidad portante baja; mientras que, el extremo sur de la ciudad de Chala (margen izquierda de la quebrada cementerio) y la parte central de la ciudad de Chala, presentan capacidad de carga media.

Tabla 8: Capacidad de carga admisible en los suelos de la ciudad de Chala.

MUESTRA	Capacidad de carga última (Tn/m ²)	Capacidad de carga admisible (Kg/cm ²)
CHA-01	69.28	2.31
CHA-02	60.92	2.03
CHA-03	167.40	4.19
CHA-04	152.02	3.80
CHA-05	49.95	1.66
CHA-06	75.87	2.53
CHA-07	154.80	3.87
CHA-08	164.88	4.12
CHA-09	185.65	4.64

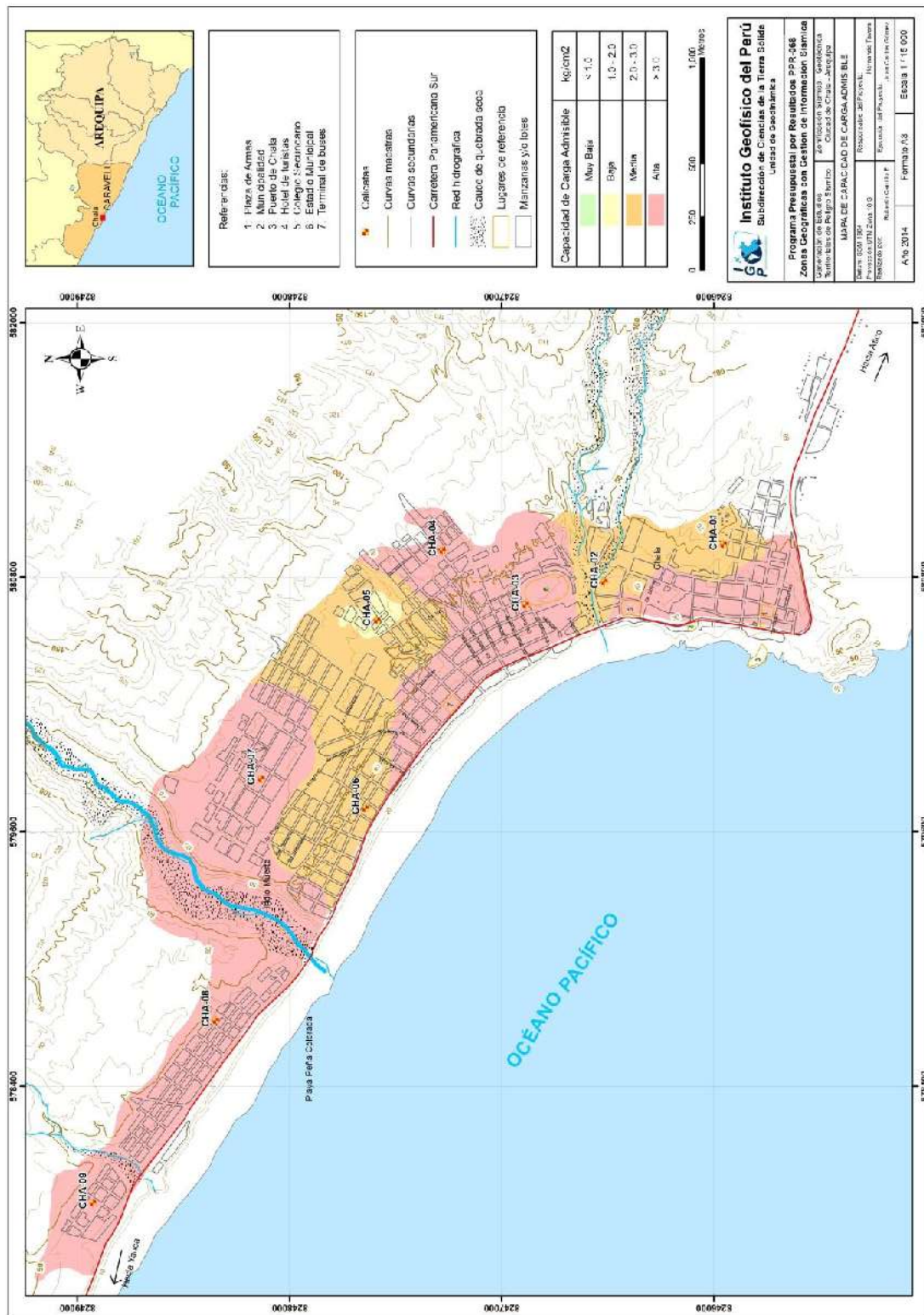


Figura 40: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Chala

Tabla 9: Rangos establecidos para la capacidad portante en la ciudad de Yauca

Capacidad Carga Admisible (Kg/cm ²)	DENOMINACION
< 1.0	MUY BAJA
1.0 - 2.0	BAJA
2.0 - 3.0	MEDIA
> 3.0	ALTA

10.2.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y de los resultados obtenidos de los ensayos granulométricos realizados en el laboratorio de la Universidad La Molina, se realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Chala. Se ha identificado la existencia de 5 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Figura 41 y Tabla 10):

.- Suelos tipo GW: Conformado por grava arenosa bien gradada con bajo contenido de material fino (6%). El contenido de humedad es de 3.10 % y constituyen suelos semi-compactos que no presentan plasticidad. Tienen capacidad de carga admisible de 3.87 Kg/cm². Los suelos que pertenecen a este tipo ocupan el 21 % de la superficie de la ciudad de Chala y han sido reconocidos a 190 m al Noreste de la avenida Progreso.

.- Suelos tipo GP: Están conformados por gravas arenosas mal graduadas y presentan material granular mayor a 59%. El contenido de humedad es de 3.80 % a 5.60 % y se les considera como suelos compactos que no presenta plasticidad. Su capacidad de carga admisible fluctúa entre 4.12 y 4.64 Kg/cm², y ocupan el 42 % de los suelos de la ciudad. Han sido identificados en sectores contiguos al estadio municipal y en el extremo Norte de la ciudad, entre el sector Indio Muerto y Aguadita.

.- Suelos tipo GM: Están conformados por gravas limosas con niveles de arenas, presentan material granular de 50% de gravas y 44% de arenas. Esto suelos ocupan el 10 % de la superficie de la ciudad con contenido de humedad de 4.20 %; por lo tanto, son suelos semicompactos, no presenta plasticidad. Su capacidad de carga admisible es de 3.80 Kg/cm² y han sido identificados en el sector: Asociación Independencia (ubicado a 520 metros al NE del estadio municipal).

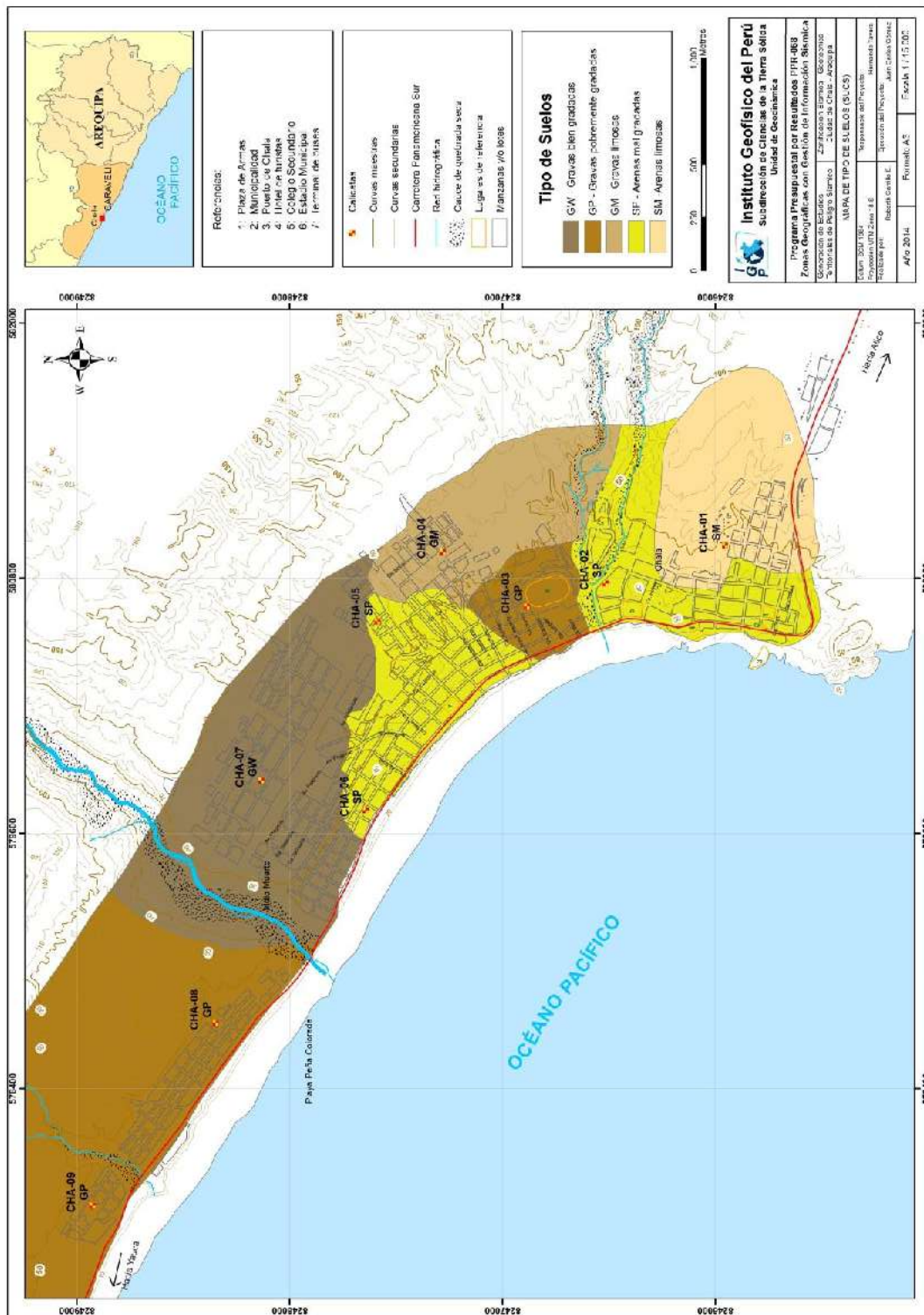


Figura 41: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Chala y alrededores

Tabla 10: Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Chala

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074mm)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	INDICE PLASTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACION SUCS	DENOMINACION
CHA-01	1.20	NP	15	67	18	NP	NP	NP	3.10	SM	Arena limosa con grava
CHA-02	3.20	NP	15	84	1	NP	NP	NP	2.80	SP	Arena fina gravosa
CHA-03	2.90	NP	59	40	1	NP	NP	NP	5.60	GP	Grava arenosa mal graduada
CHA-04	2.60	NP	50	44	6	NP	NP	NP	4.20	GM	Grava limosa con arena
CHA-05	2.80	NP	0	99	1	NP	NP	NP	2.90	SP	Arena fina a media
CHA-06	3.30	NP	25	73	2	NP	NP	NP	3.20	SP	Arena mal graduada
CHA-07	2.80	NP	65	29	6	NP	NP	NP	3.10	GW	Grava bien graduada
CHA-08	3.40	NP	60	39	1	NP	NP	NP	2.90	GP	Grava arenosa mal graduada
CHA-09	3.15	NP	68	31	1	NP	NP	NP	3.80	GP	Grava arenosa mal graduada

*.- **Suelos tipo SP:** Están conformados por arenas mal graduadas y su contenido de humedad es de 2.80% a 3.20%; por lo cual, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos y no presentan plasticidad. Su capacidad de carga se encuentra entre 1.66 y 2.53 Kg/cm² y representan el 17 % del área de la ciudad. Estos suelos han sido identificados en el sector contiguo a la quebrada Cementerio.*

*.- **Suelos tipo SM:** Están conformados por arenas limosas con contenido de humedad de 3.10% a 4.20%; por lo cual, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos y no presentan plasticidad. Presentan capacidad de carga admisible 2.31 Kg/cm² y representan el 10% del área de la ciudad de Chala. Estos suelos fueron identificados a 370 m al NE de la Plaza Central y a 510 m al NE del estadio municipal.*

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

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

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 Chala, 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 42 se muestra la distribución espacial de los 122 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 43 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto CH-37. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 15 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes a 1.2 Hz y 4.4 Hz con amplificaciones relativas de hasta 4.5 y 4.0 veces con respecto al nivel de referencia. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que la energía se irradia predominantemente en dirección norte-sur. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

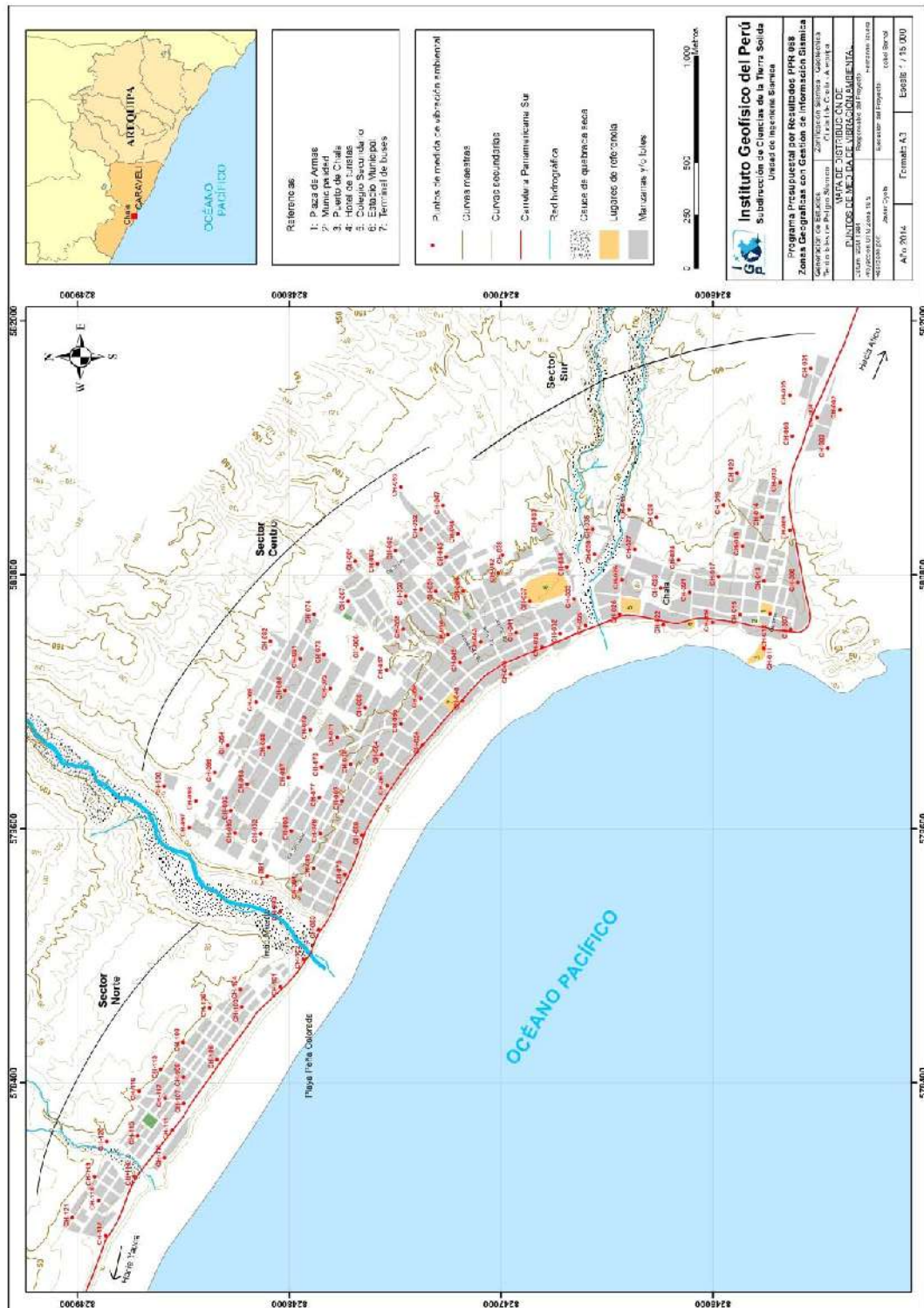


Figura 42: Mapa de la ciudad de Chala y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

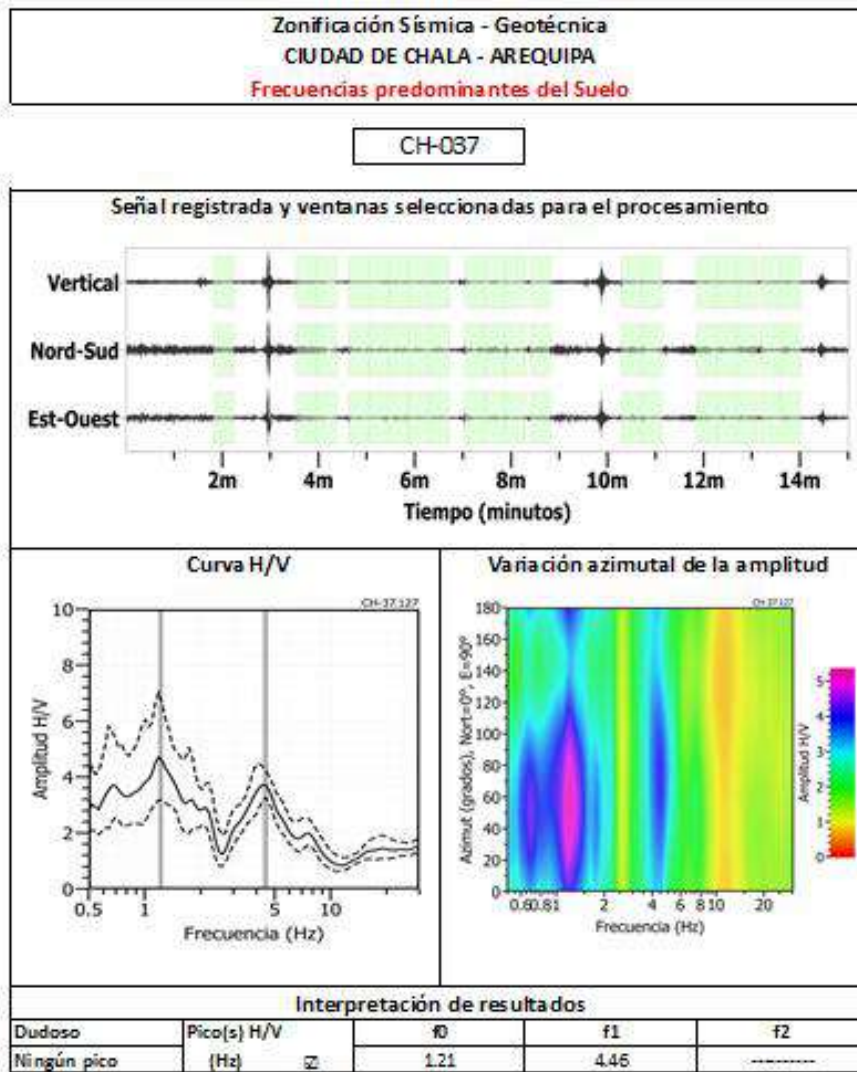


Figura 43: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CH-37 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio, razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

.- 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 predominantes, 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 tres rangos de frecuencia: **F₀** ($F < 2.0$ Hz), **F₁** ($2.0 \text{ Hz} \geq F \leq 10.0$ Hz) y **F₂** ($F > 10.0$ Hz), en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con diferentes amplificaciones. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Chala.

***.- Frecuencias predominantes F₀:** Según la Figura 44, las frecuencias fluctúan entre 0.5 a 1.9 Hz y se encuentran presentes hacia el extremo norte y centro del área urbana de Chala, estando los valores más bajos al norte de la quebrada de Chala (0.5 a 0.6 Hz). En el extremo sur del área de estudio, los valores de frecuencias entre 0.6 y 1.8 Hz se distribuyen de manera dispersa. En la Figura 45, se presenta ejemplos de razones espectrales obtenidas para los puntos CH-75, CH-94 y CH-100, todos ubicados en la parte central de la ciudad de Chala con frecuencias de 1.2 Hz y amplificaciones de hasta 3 veces.*

***.- Frecuencias predominantes F₁:** La Figura 44 muestra que este rango de frecuencias se encuentran concentrados en tres áreas con valores similares, la primera, ubicada en el extremo SO del sector central de Chala con valores entre 2 y 2.5 Hz; la segunda rodea a la primera y se extiende sobre el extremo NO de dicho sector con valores entre 2.8 y 3.8 Hz. La tercera con frecuencias mayores a 3.8 Hz, rodea a la segunda y se concentra hacia el extremo NE y sur del área de estudio. De manera dispersa, estos valores de frecuencias también son observados en el sector norte.*

En la Figura 46, se muestran ejemplos de razones espectrales característicos. Para la primera área se considera las razones espectrales obtenidas para los puntos CH-55, CH-65 y CH-71 con frecuencias predominantes a 2 Hz y amplificaciones de hasta 3 veces; además, en los dos últimos puntos se observan frecuencias a 6 y 4.5 Hz con amplificaciones mínimas. Para la segunda área se considera los puntos CH-57, CH-68 y CH-73 con frecuencias de 3, 3.2 y 3.5 Hz y amplificaciones de hasta 3 veces. Para la tercera área, se considera las razones espectrales para los puntos CH-25, CH-30 y CH-41 ubicados próximos

al estadio de Chala, con frecuencias predominantes de 6.3, 7.4 y 4.0 Hz y amplificaciones entre 2 y 3.5 veces.

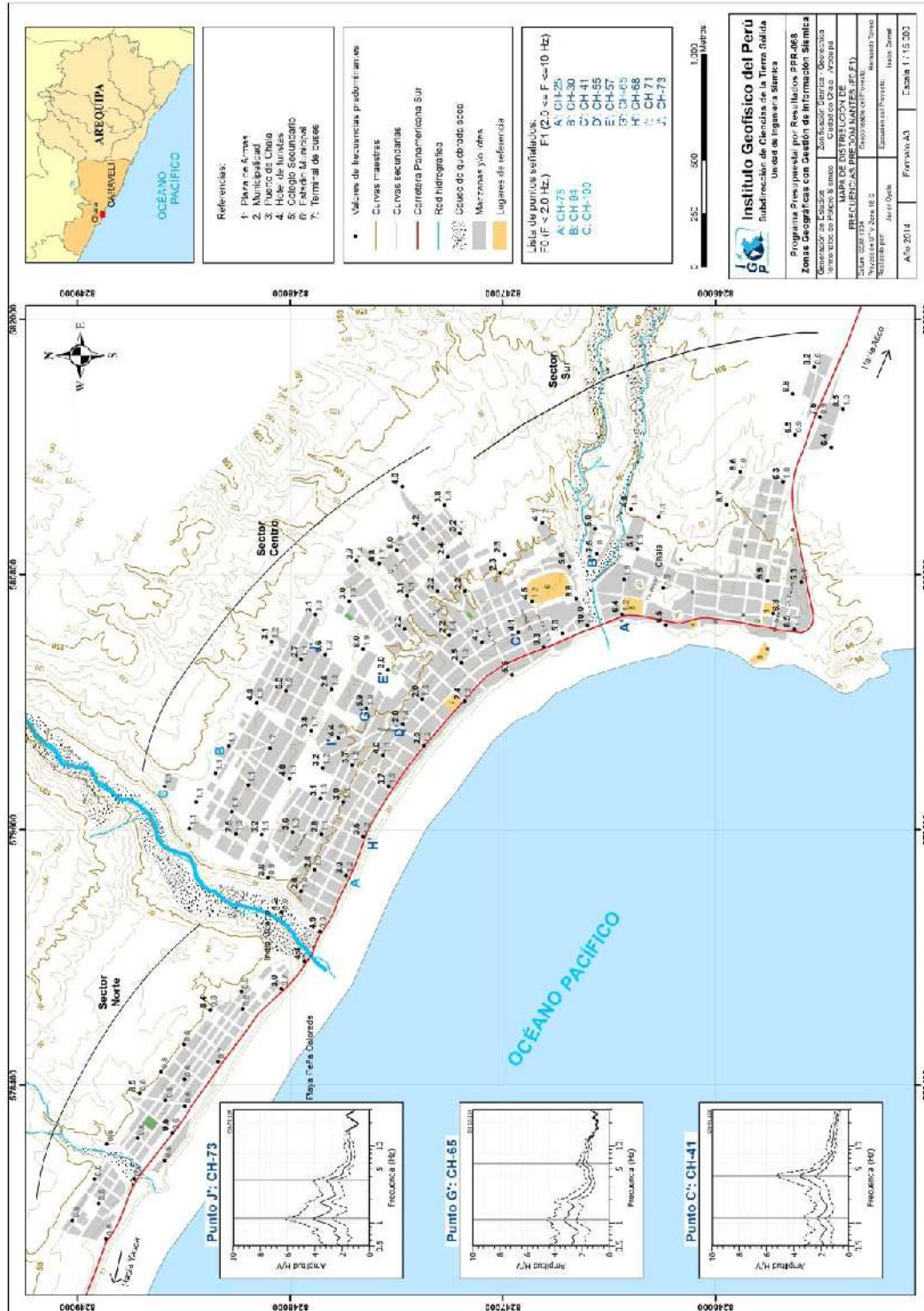
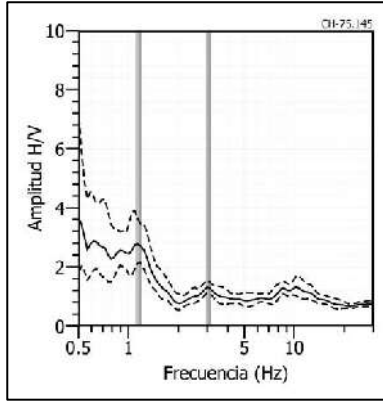
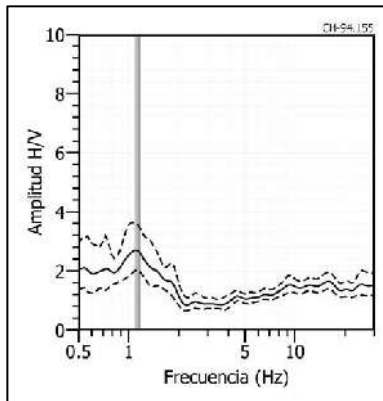


Figura 44: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F < 2.0$ Hz) y F_1 ($2.0 \text{ Hz} \leq F \leq 10 \text{ Hz}$), indicados con números en color gris y negro. Las letras corresponden a puntos considerados como representativos para estos rangos de frecuencias, cuyos gráficos se presentan en la Figura 45.

CH - 75



CH - 94



CH - 100

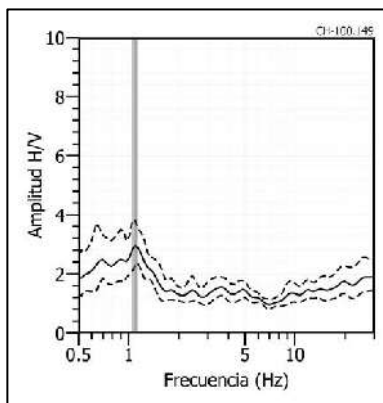
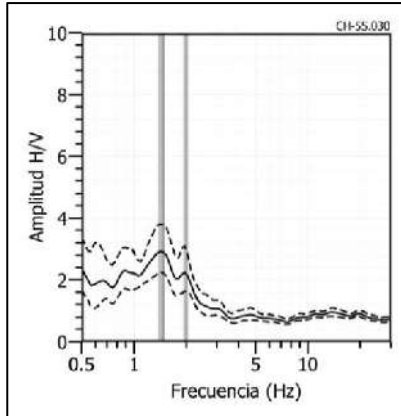
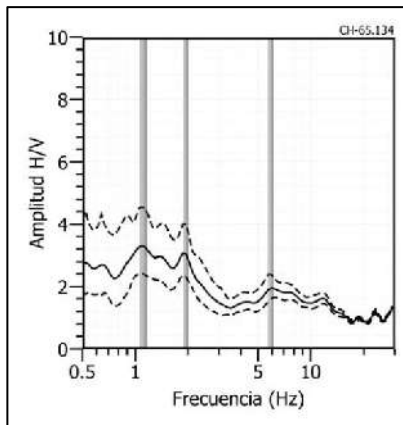


Figura 45: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F_0 ($F < 2.0$ Hz). Para los puntos CH-75, CH-94 y CH-100, ubicados en el sector central de la zona de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CH - 55



CH - 65



CH - 71

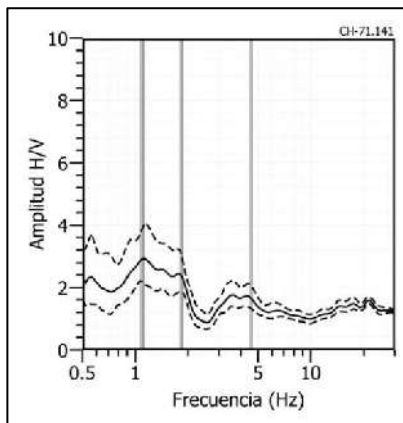
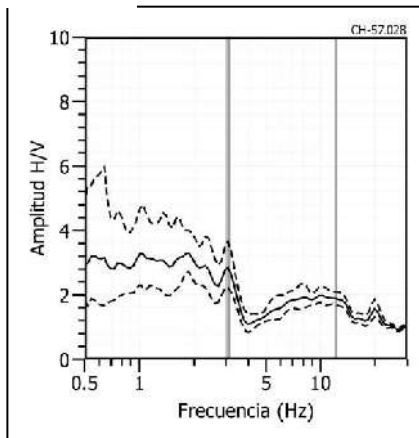
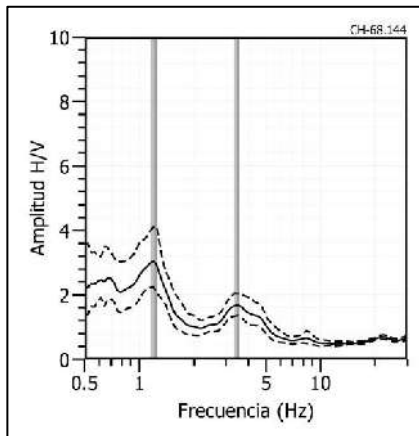


Figura 46: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($2.0\text{Hz} \leq F \leq 10\text{Hz}$). Para los puntos CH-55, CH-65 y CH-71, ubicados en el extremo SO del sector central de la zona de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CH - 57



CH - 68



CH - 73

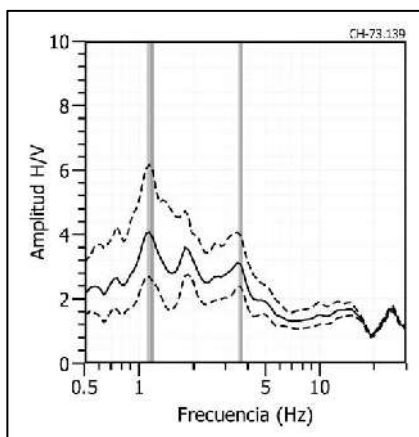
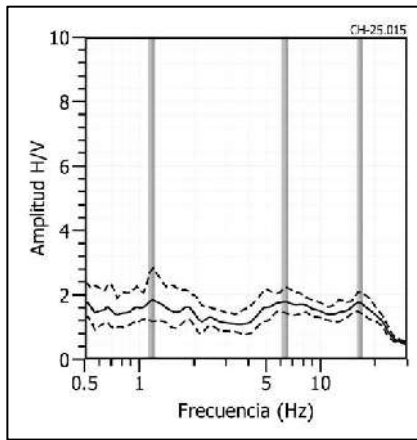
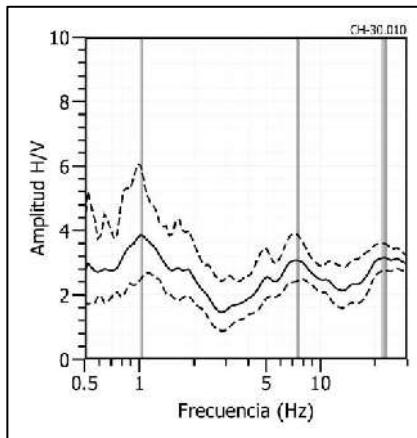


Figura 46: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($2.0\text{Hz} \leq F \leq 10\text{Hz}$). Para los puntos CH-57, CH-68 y CH-73, ubicados en el extremo NO del sector central de la zona de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CH - 25



CH - 30



CH - 41

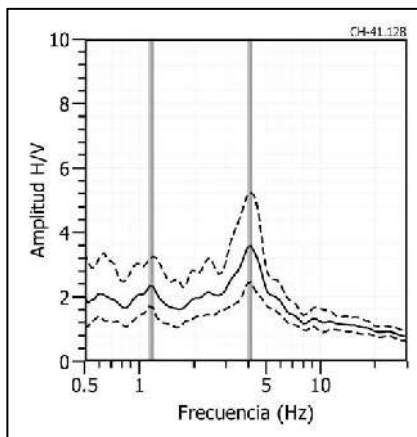


Figura 46: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($2.0\text{Hz} > F \leq 10\text{Hz}$). Para los puntos CH-25, CH-30 y CH-41, ubicados próximos al estadio de Chala. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante

.- Frecuencias predominantes F2: Este rango de frecuencia es identificado en un menor número de puntos (Figura 47), todos ubicados principalmente en los extremos del sector Sur y hacia el extremo NO del área de estudio. Los valores fluctúan principalmente entre 10 y 20 Hz con amplificaciones de hasta 3 veces en algunos puntos. En la Figura 48, se muestra ejemplos de razones espectrales característicos para los puntos CH-09, CH-15 y CH-23 ubicados próximos a la Plaza de Armas de Chala. En el sector Sur del área de estudio, se identifica frecuencias mayores a 10 Hz con bajas amplificaciones, y en algunos casos como en CH-15, no se observa picos de frecuencias, lo cual evidencia la mayor estabilidad de los suelos. Finalmente, para el sector Norte se considera las razones espectrales para los puntos CH-101, CH-107 y CH-119, con factores de amplificación mínima.

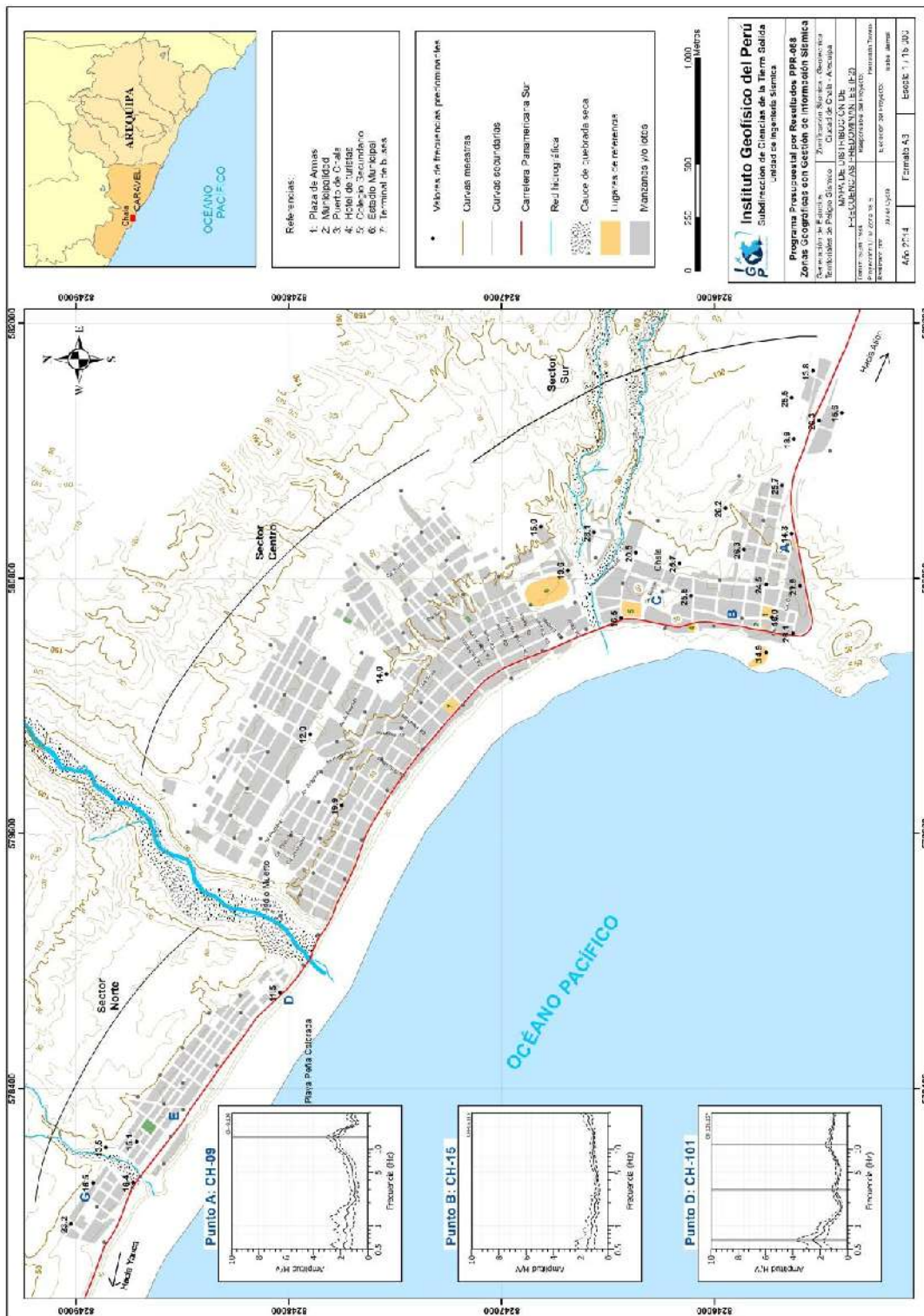
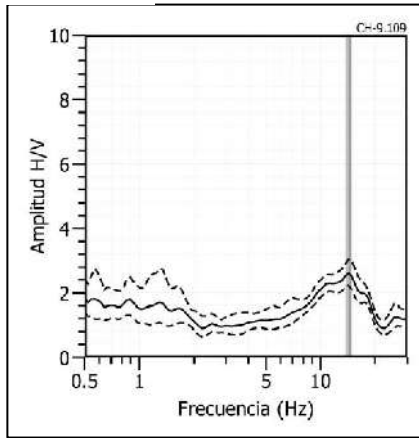
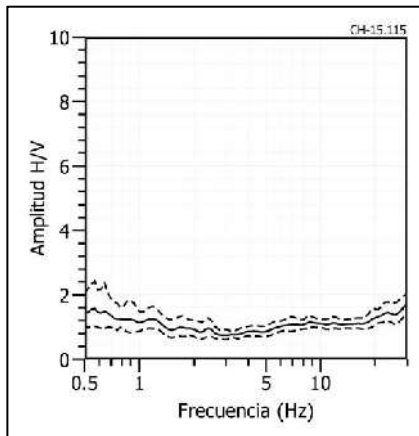


Figura 19: Mapa del área de estudio y la distribución espacial de las frecuencias predominantes F_2 ($F > 10\text{Hz}$).

CH - 09



CH - 15



CH - 23

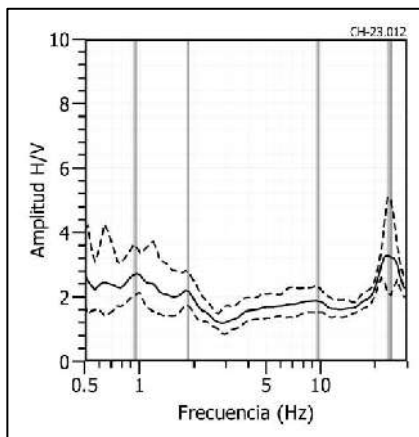
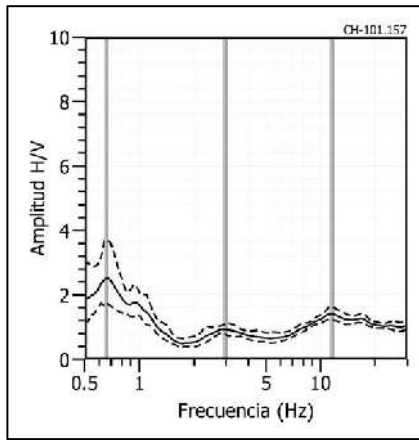
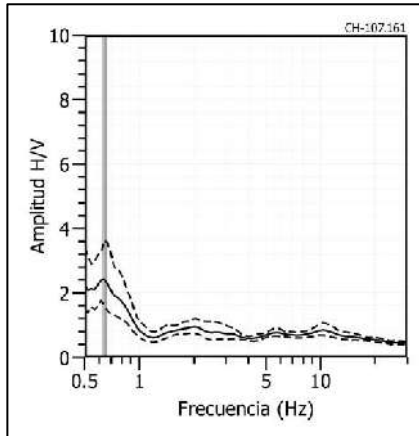


Figura 48: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F2 ($F > 10$ Hz). Para los puntos CH-09, CH-15 y CH-23, ubicados próximos a la plaza de armas de Chala en el sector Sur del área de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CH - 101



CH - 107



CH - 119

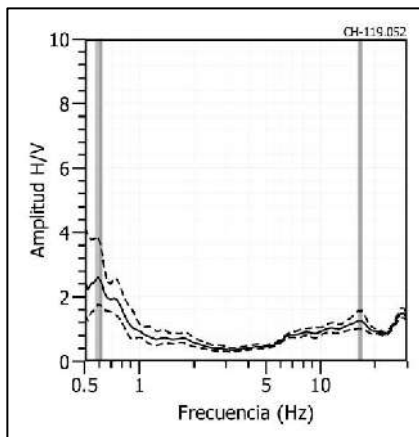


Figura 48: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F2 ($F > 10\text{Hz}$). Para los puntos CH-101, CH-107 y CH-119, ubicados en el sector Norte de la zona de estudio. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

11.2.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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

Para el registro de 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 110dB. 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 49, se presenta el mapa de la ciudad de Chala con la distribución espacial de 5 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-CH,....., LR05-CH. Las curvas de dispersión de ondas obtenidas para cada tendido y número de impactos, fueron promediadas y luego invertidas usando el algoritmo DINVER a fin de obtener perfiles de velocidad para puntos específicos del tendido. Para el análisis de los resultados se considera la clasificación, que la Norma E-030 establece, para cada tipo de suelo en base a los siguientes rangos de velocidades para las ondas de corte (V_s):

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

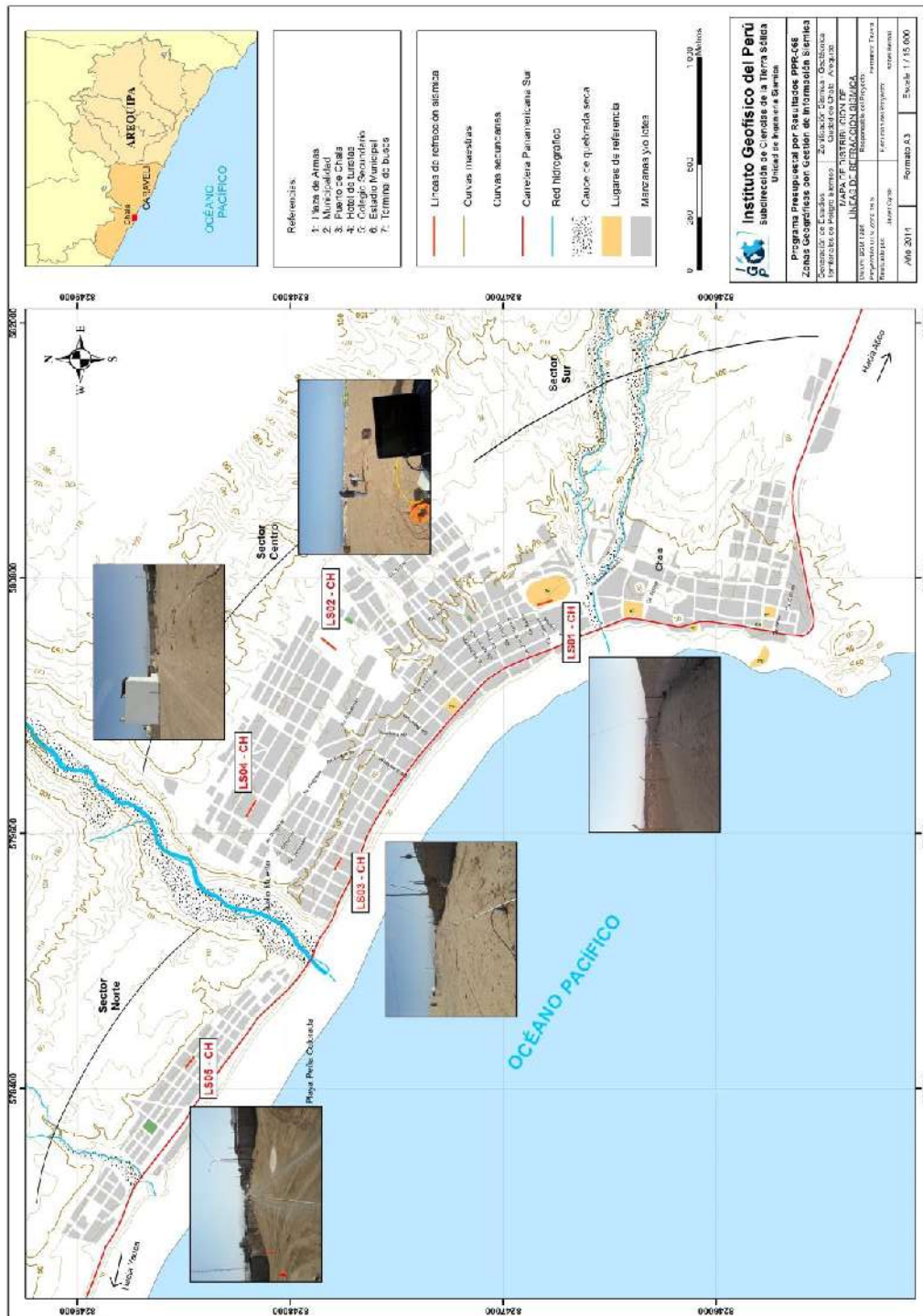


Figura 49: Mapa de la ciudad de Chala y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-CH, ..., LR05-CH.

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 Chala (Figura 50).

Arreglo Lineal LR01-CH: El arreglo se realizó en el interior del estadio Salomón Pineda ubicado en el asentamiento humano Nueva Juventud. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 8 metros y velocidades V_s de 300 m/s y la segunda, con un espesor de 31 metros y velocidades V_s de 530 m/s correspondientes a suelos moderadamente duros a muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 900 m/s (Figura 50a).

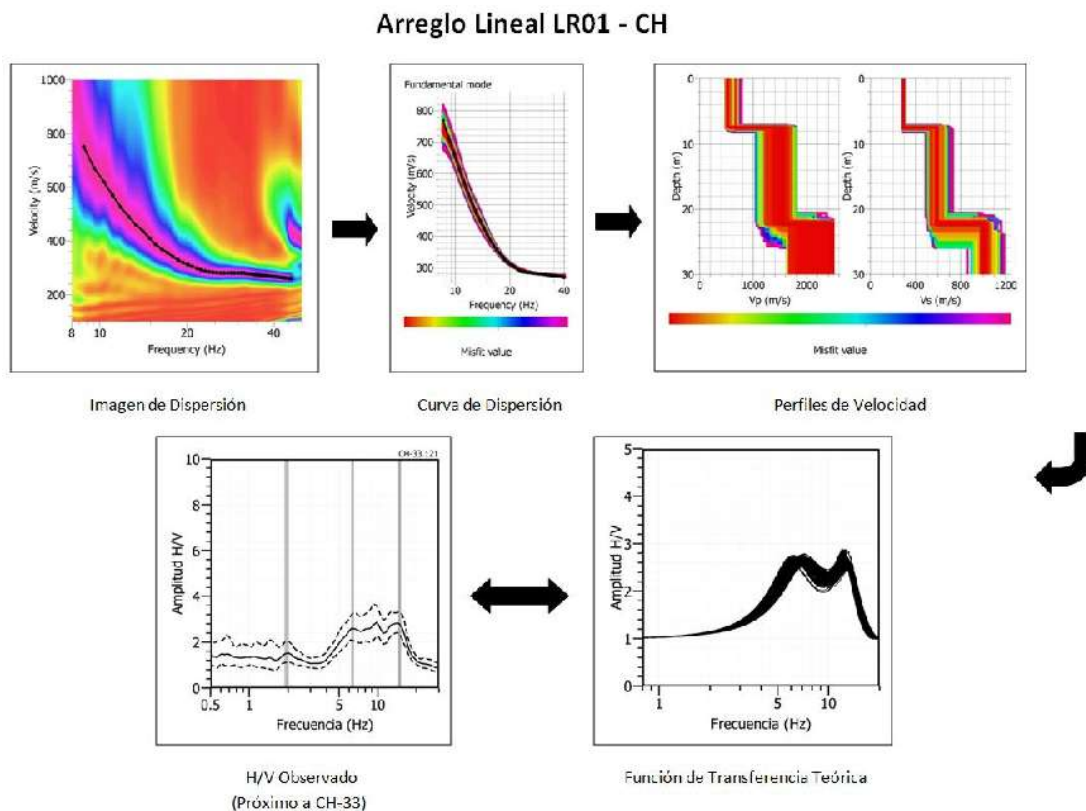


Figura 50a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR01 - CH.

Arreglo Lineal LR02-CH: El arreglo se realizó en el extremo Este del sector central de Chala. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 6 metros y velocidades V_s de 380 m/s correspondiendo a suelos duros. La segunda presenta un espesor de 15 metros y velocidades V_s de 530 m/s correspondientes a suelos muy duros. La

superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 820 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 50b).

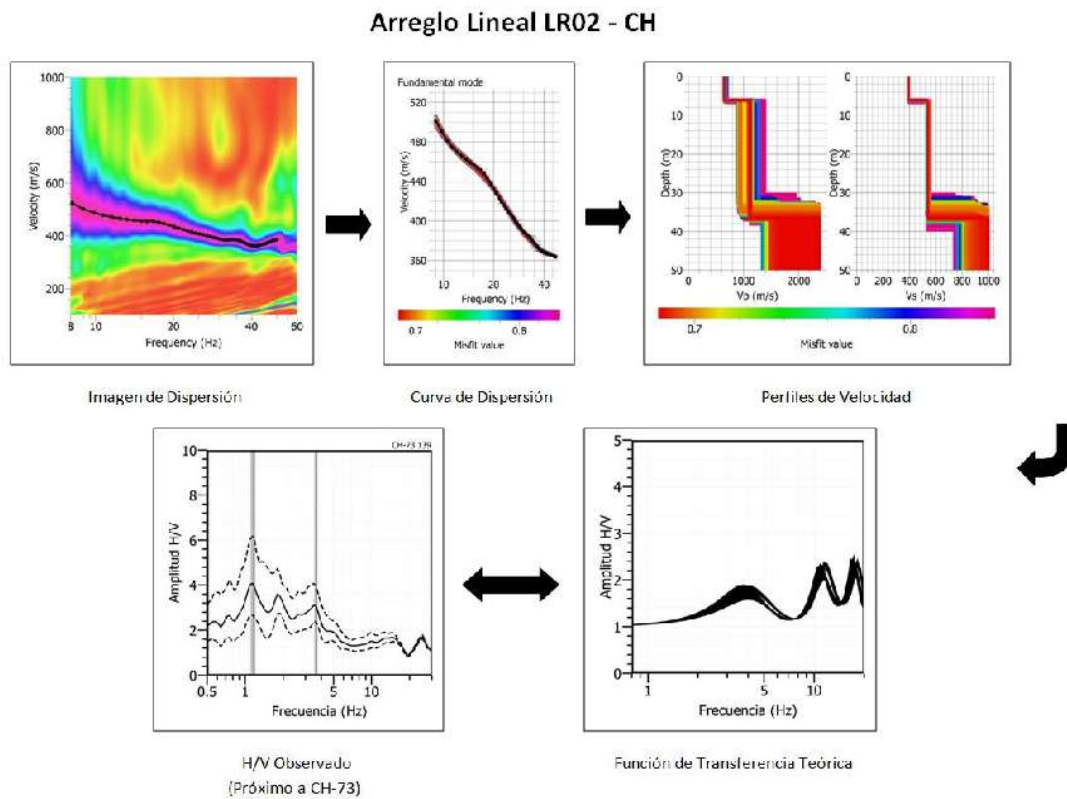


Figura 50b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR02 - CH.

Arreglo Lineal LR03-CH: El arreglo se realizó en el extremo NO del sector central de Chala. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 12 metros y velocidades V_s de 380 m/s correspondiendo a suelos duros. La segunda capa presenta un espesor de 16 metros con velocidades V_s de 570 m/s correspondientes a suelos moderadamente duros a muy duros. La superficie de contacto presenta velocidades V_s de 970 m/s corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 50c).

Arreglo Lineal LR04-CH: El arreglo se realizó en el extremo NE del sector central de Chala. Los resultados muestran la presencia de una capa uniforme con un espesor de hasta 26 metros y velocidades V_s de 590 m/s, correspondiendo a suelos a suelos muy duros o roca blanda (Figura 50d).

Arreglo Lineal LR03 - CH

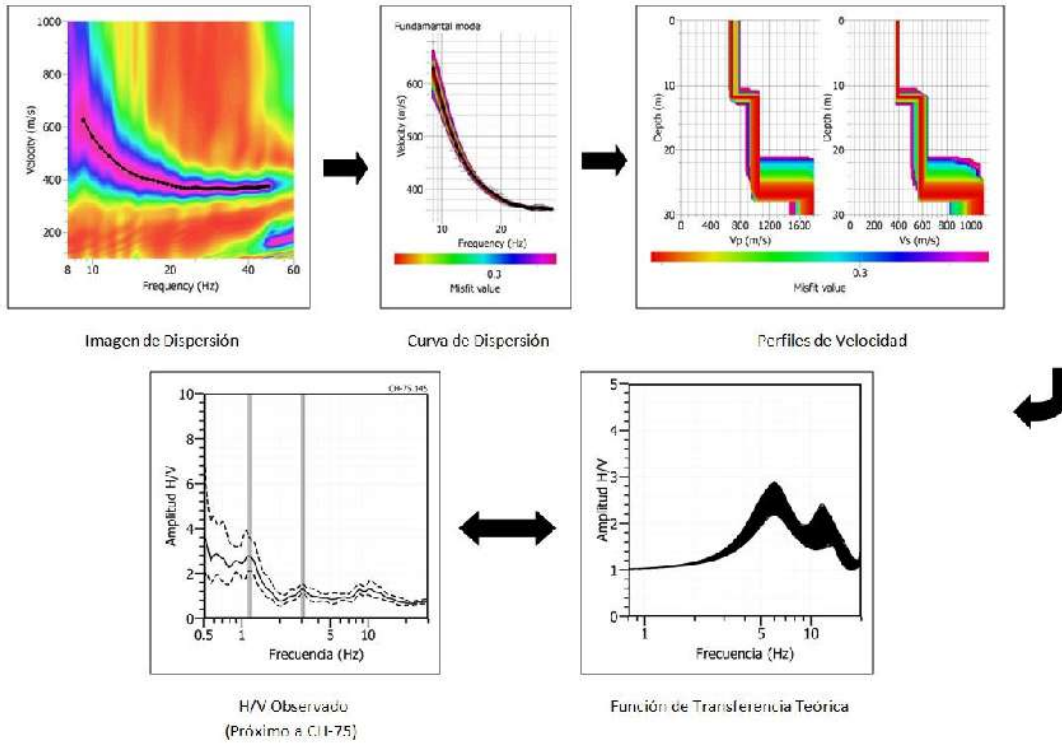


Figura 50c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR03 - YA.

Arreglo Lineal LR04 - CH

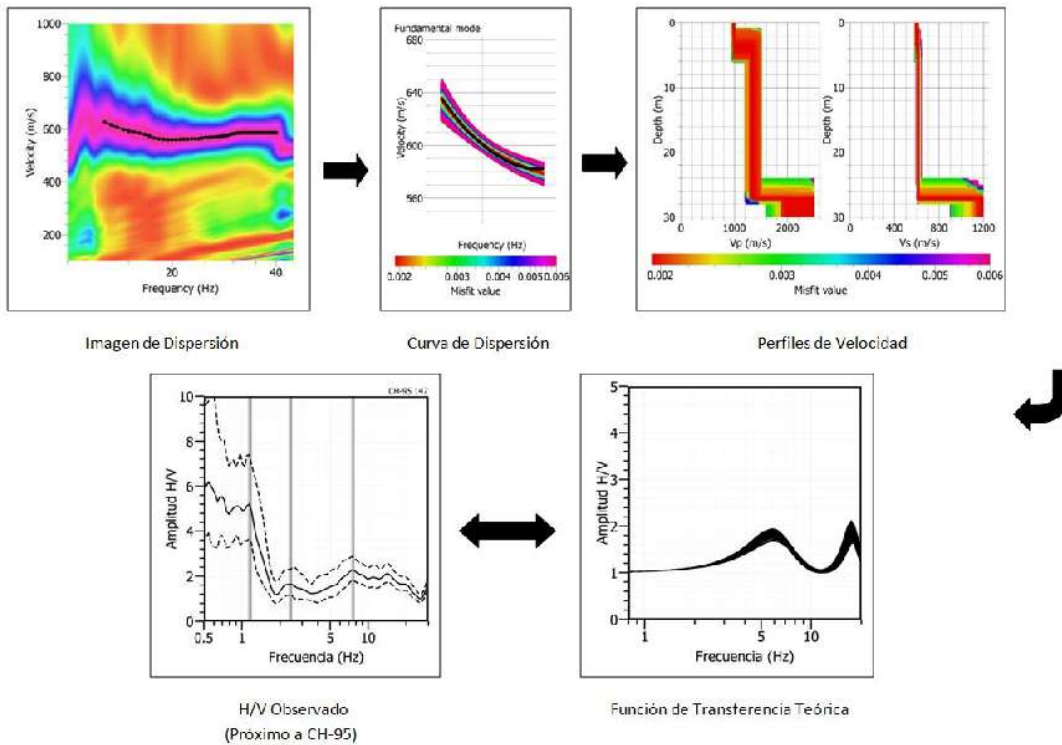


Figura 50d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR04 - YA.

Arreglo Lineal LR05-CH: El arreglo se realizó en el sector Norte de Chala. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 6 metros y velocidades V_s de 400 m/s correspondiendo a suelos duros. La segunda capa presenta un espesor de 19 metros y velocidades V_s de 520 m/s correspondientes a suelos muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa presenta velocidades V_s de hasta los 1100 m/s correspondiendo a rocas moderadamente duras (Figura 50e).

En resumen, en los suelos de la ciudad de Chala se ha identificado la presencia de dos capas que influyen en la respuesta de los suelo, la primera con velocidades que fluctúan de entre 300 a 400m/s y espesores que varían entre los 6 a 12 metros, y la segunda capa, con velocidades de 300 a 590m/s y espesores que varían entre los 15 y 26 metros. Estos resultados evidencian la presencia de suelos consistentes.

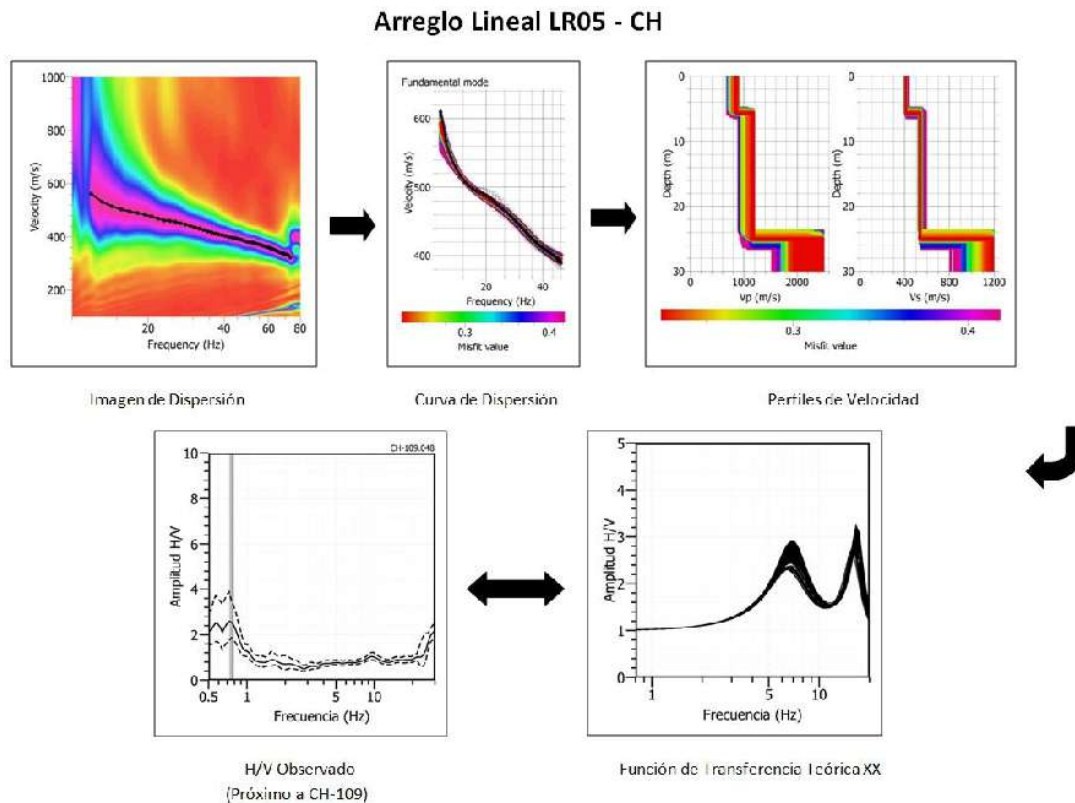


Figura 50e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR05-CH.

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 51 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la localidad de Chala y los resultados obtenidos permiten observar que periodos de 0.5 segundos se concentran en el extremo SO del centro de la ciudad, rodeados por periodos de 0.3 y 0.4 segundos, estos últimos abarcan un 80% de la superficie del área urbana de la ciudad de Chala. Los periodos sugieren la presencia de una capa superficial de moderado espesor que disminuye progresivamente hacia su extremo NO y rápidamente hacia los extremos NE y sur. Los periodos de 0.1 y 0.2 segundos se distribuyen en el extremo NE y SO del sector central con amplificaciones menores; asimismo, estos valores están presentes de manera dispersa en el sector norte y sur. En general, los valores obtenidos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor depositada sobre suelo duro y/o roca.

El análisis en detalle de la información, permite identificar la presencia de periodos entre 0.6 a 1.6 segundos, lo cual indican que los suelos en la ciudad de Chala son afectados por efectos topográficos y/o cercanía al mar; por lo tanto, se requiere realizar análisis con mayor información, pero deben ser considerados en futuros proyectos de ingeniería.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Chala 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 380 a 500 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores de 28 a 38 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos.

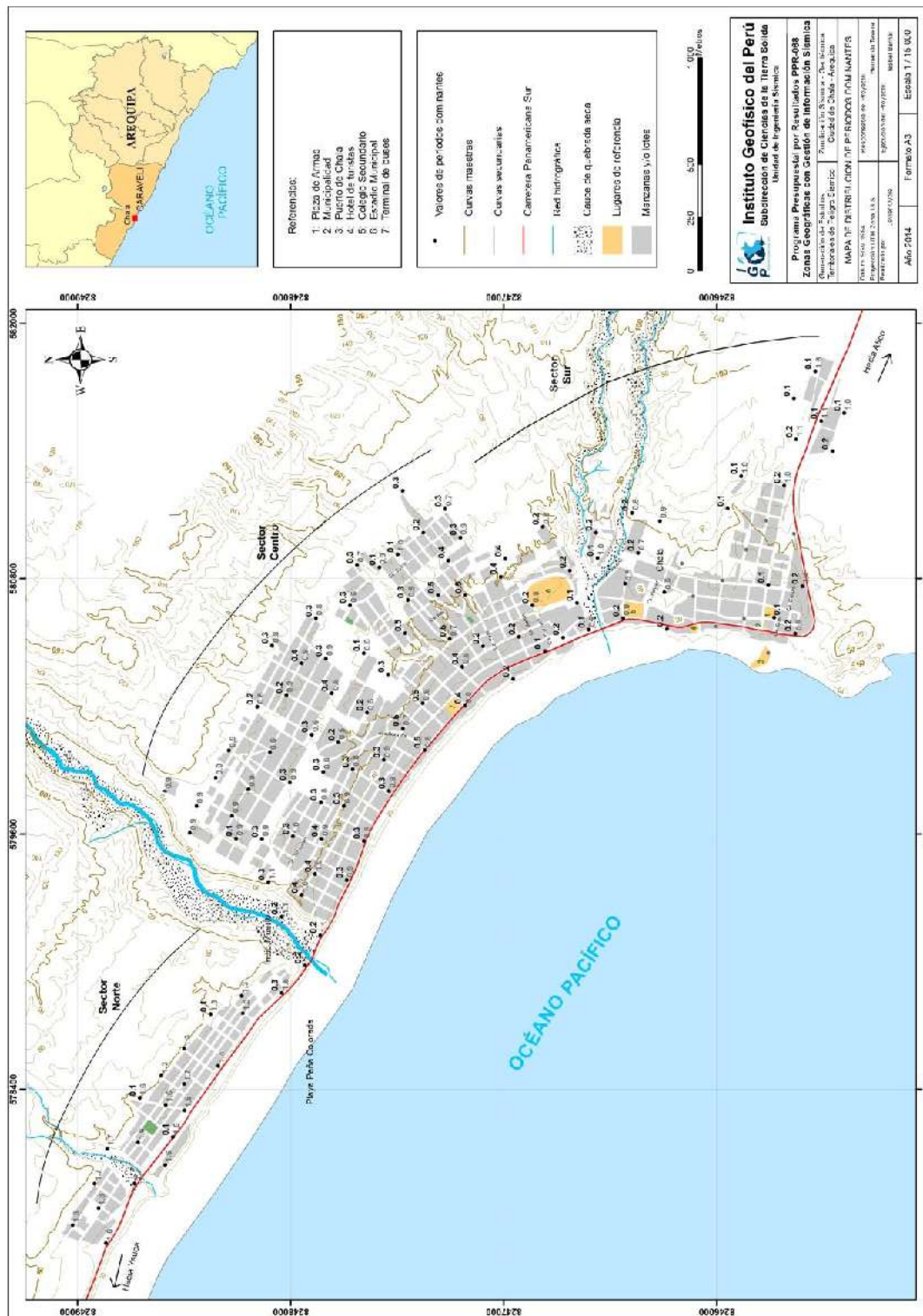


Figura 51: Mapa de la ciudad de Chala y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. Los valores en negro, indican los periodos dominantes fundamentales y en gris, los secundarios.

Finalmente, el mapa de periodos dominantes muestra la presencia de dos áreas con suelos dinámicamente similares. Los periodos mayores a 0.3 segundos se encuentran en un 70% del área total de la ciudad de Chala y sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de moderado espesor que domina el comportamiento dinámico de los suelos. Los periodos menores e iguales a 0.3 segundos, se encuentran distribuidos en los sectores Norte, Sur y en el extremo NE del sector central. Estos periodos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por la capa más profunda y de mayor espesor; por lo que, presenta efectos especiales asociados a la dinámica local del subsuelo.

11.4.- Estudios de Tomografía Eléctrica

La tomografía eléctrica permite obtener información sobre las propiedades físicas del subsuelo mediante la evaluación del parámetro de resistividad al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad permite conocer la resistividad del subsuelo asociado a la presencia de capas y superficies con mayor o menor contenido de agua. En la ciudad de Chala se han realizado 5 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y la distribución de 25 electrodos con un espaciamiento de 5 y 10 metros entre electrodo y sobre un tendido longitudinal de 120 y 240 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 20 metros (Figura 52).

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 Chala (Figura 53).

-Sección geo-eléctrica L01-CH: Sección realizada en el sector sur del área de estudio a 300 m de la Panamericana Sur, observándose el dominio de valores de resistividad que van desde bajos a muy bajos resistivos. Los valores de 20 a 100 ohm.m, ocupan el 90% de la sección y los materiales que conforman a los suelos superficiales son de tipo arenoso, arcilloso y gravas de diferentes tamaños (Figura 53a).

-

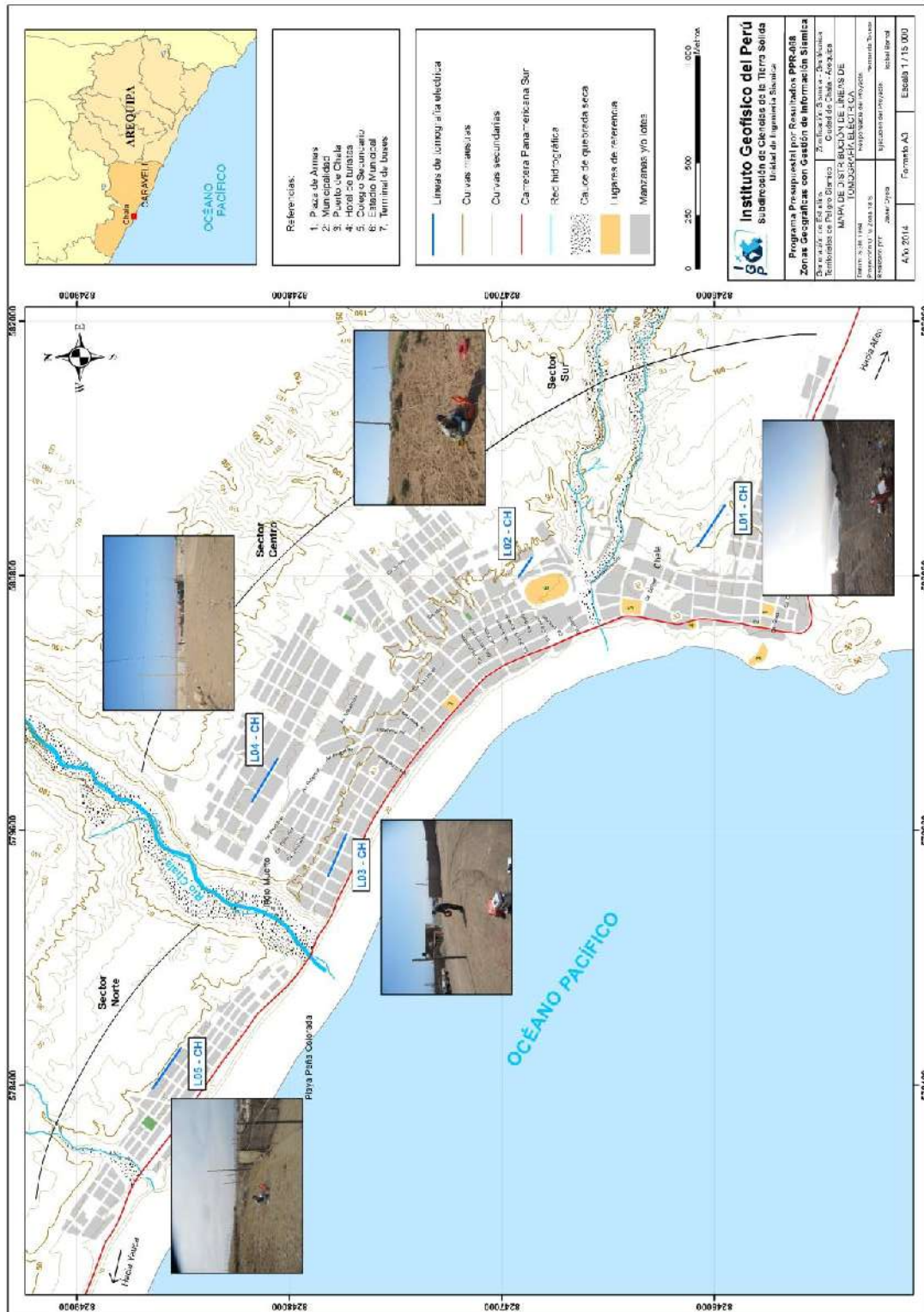


Figura 52: Mapa de la ciudad de Chala y ubicación de las 5 líneas de tomografía eléctrica.

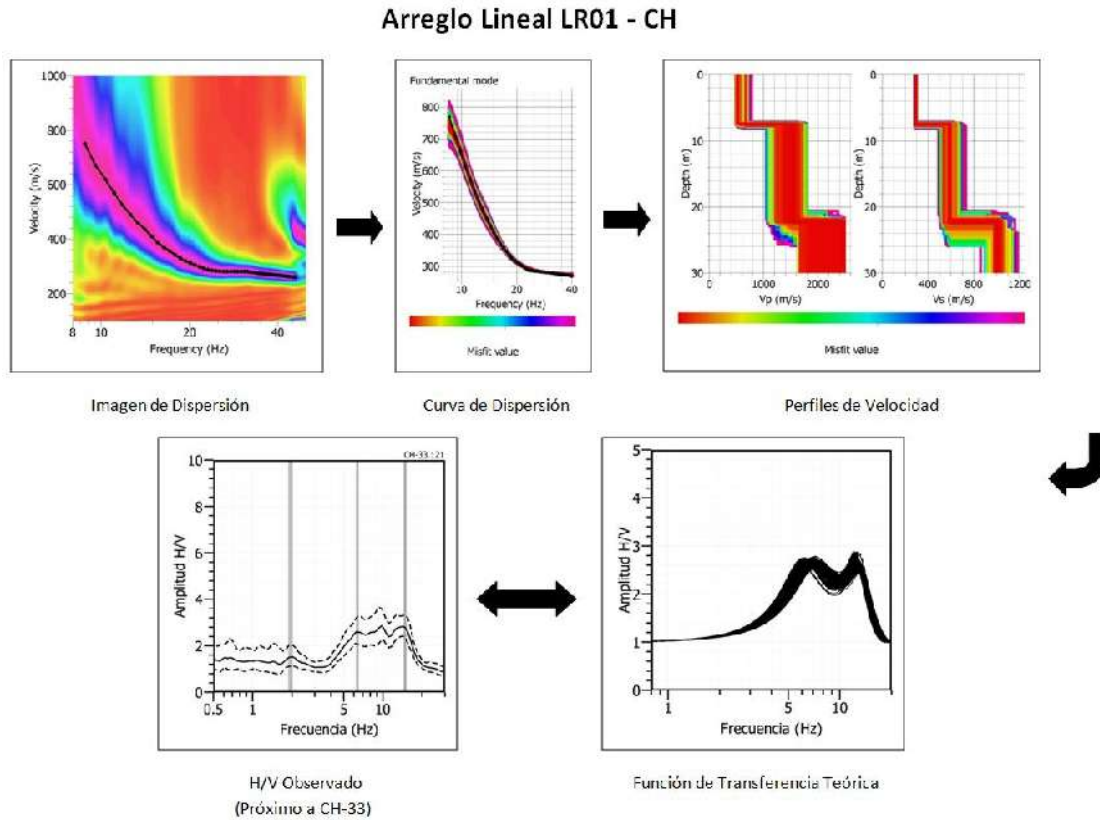


Figura 53a: Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L01-CH.

-Sección geo-eléctrica L02-CH: Sección realizada en el sector central del área de estudio a 80 m del estadio de Chala y sobre material suelto con presencia de vegetación. En la sección se observa el predominio de valores muy bajos resistivos, menores a 20 ohm.m. Sobre un área menor, hacia el extremo izquierdo superficial de la sección, se distribuyen valores alrededor de los 80 ohm.m, debido a la presencia de materiales de relleno (montículos de desmote) y de vegetación (Figura 53b).

-Sección geo-eléctrica L03-CH: Sección realizada en el extremo NO del área de estudio, sobre suelos con presencia de arena suelta al inicio de la línea y materiales de mayor consistencia a mayor distancia sobre la sección. En la sección predominan los valores que van de los muy bajos resistivos (menor a 20 ohm.m) a los medianamente resistivos (500 ohm.m). Los valores mayores a 25 ohm.m se distribuyen a lo largo de toda la sección y hasta profundidades de 19 metros. Los valores más altos se concentran entre los 60 y 170 metros de distancia a lo largo de la sección y hasta una profundidad de 10 metros. A mayores niveles de profundidad predominan valores bajos resistivos. En superficie, los valores obtenidos

corresponden a suelos compactos y a mayor profundidad, a suelos saturados (cercanía al mar), Figura 53c.

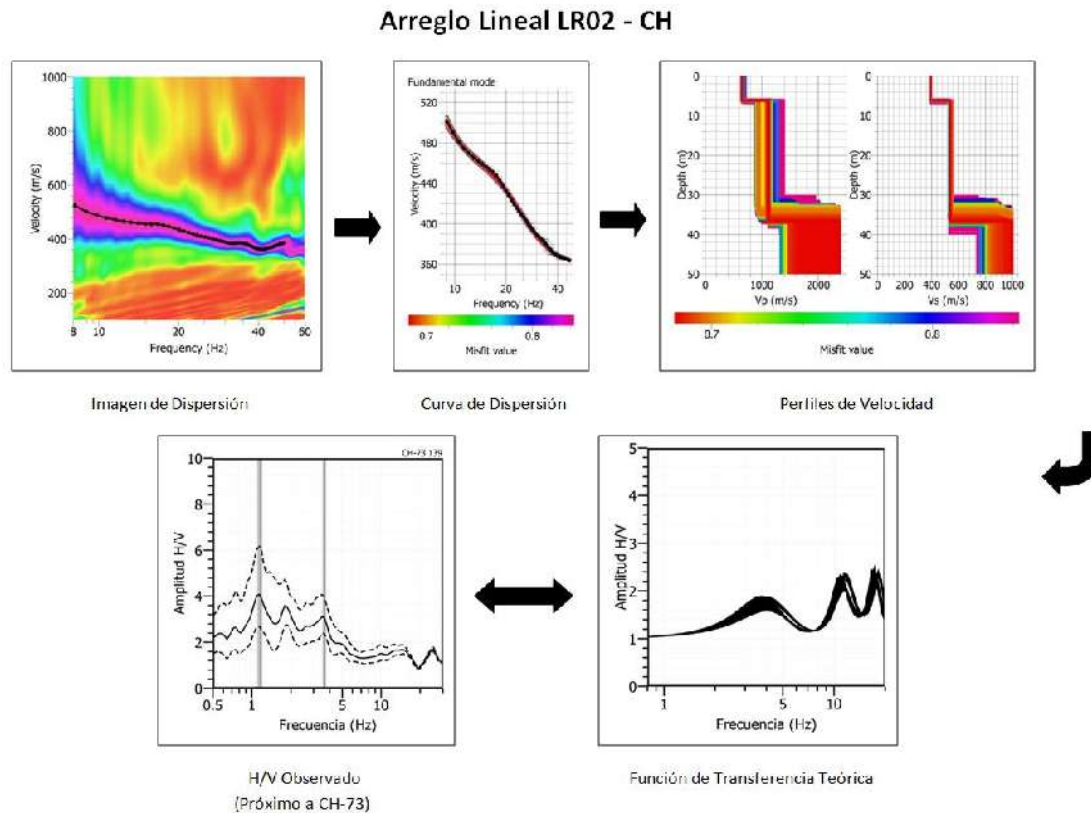


Figura 53b: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L02-CH.

-Sección geo-eléctrica L04-CH: Sección realizada en el extremo NE del sector central del área de estudio, observándose el predominio de valores resistivos a bajo resistivos, los cuales se distribuyen de manera horizontal a lo largo de toda la sección Los valores mayores de 60 ohm.m alcanzan profundidades de 10 metros, los valores de 8 a 60 ohm.m de 25 metros. A mayor profundidad los valores disminuyen. En superficie se observa la presencia de suelos de tipo arenoso con presencia de gravas (Figura 53d).

-Sección geo-eléctrica L05-CH: Sección realizada en el sector norte del área de estudio, con el predominio de valores bajo resistivos. En la sección se tiene áreas con valores resistivos que fluctúan alrededor de los 500 ohm.m, asociados a la presencia de cantos rodados presentes en la zona. Los valores bajos resistivos (menor a los 100 ohm.m), se asocian a zonas saturadas por efectos de filtración de agua (Figura 53e).

Arreglo Lineal LR03 - CH

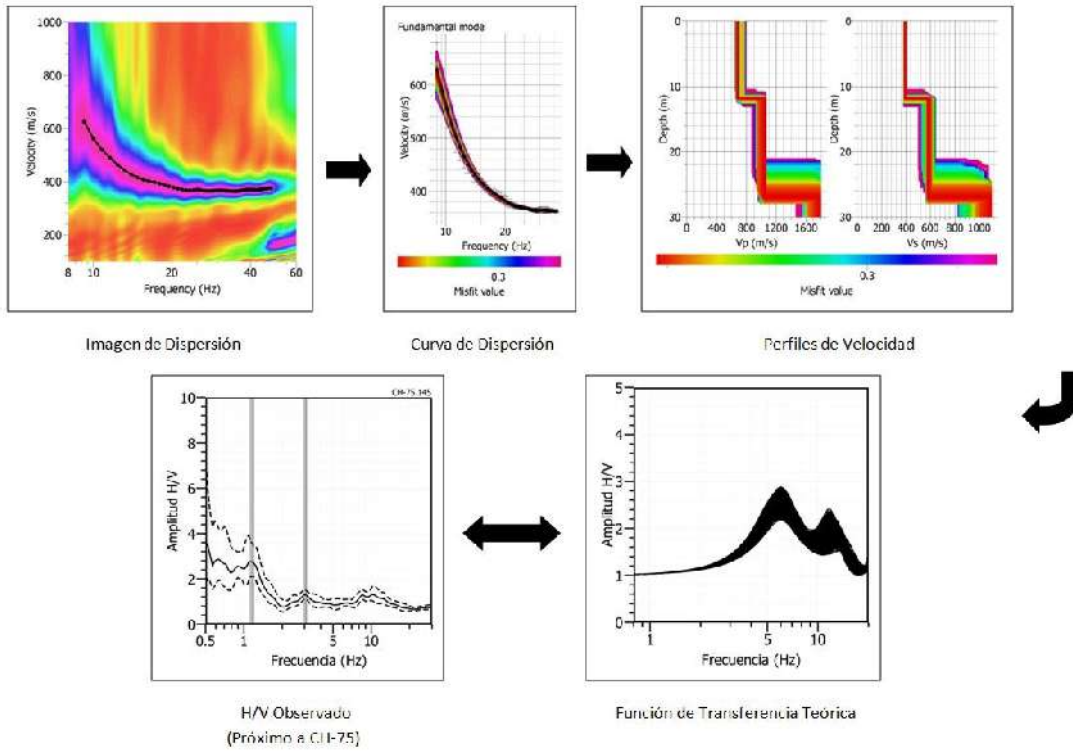


Figura 53c: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L03-CH.

Arreglo Lineal LR04 - CH

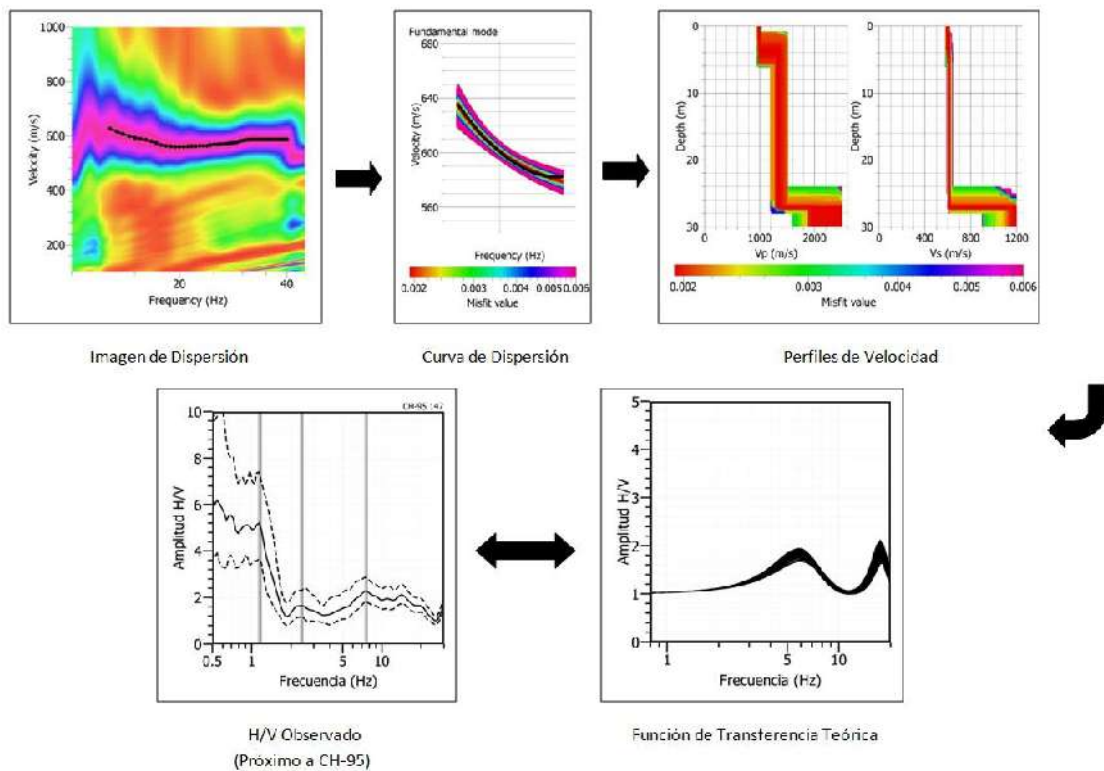


Figura 53d: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L04-CH.

Arreglo Lineal LR05 - CH

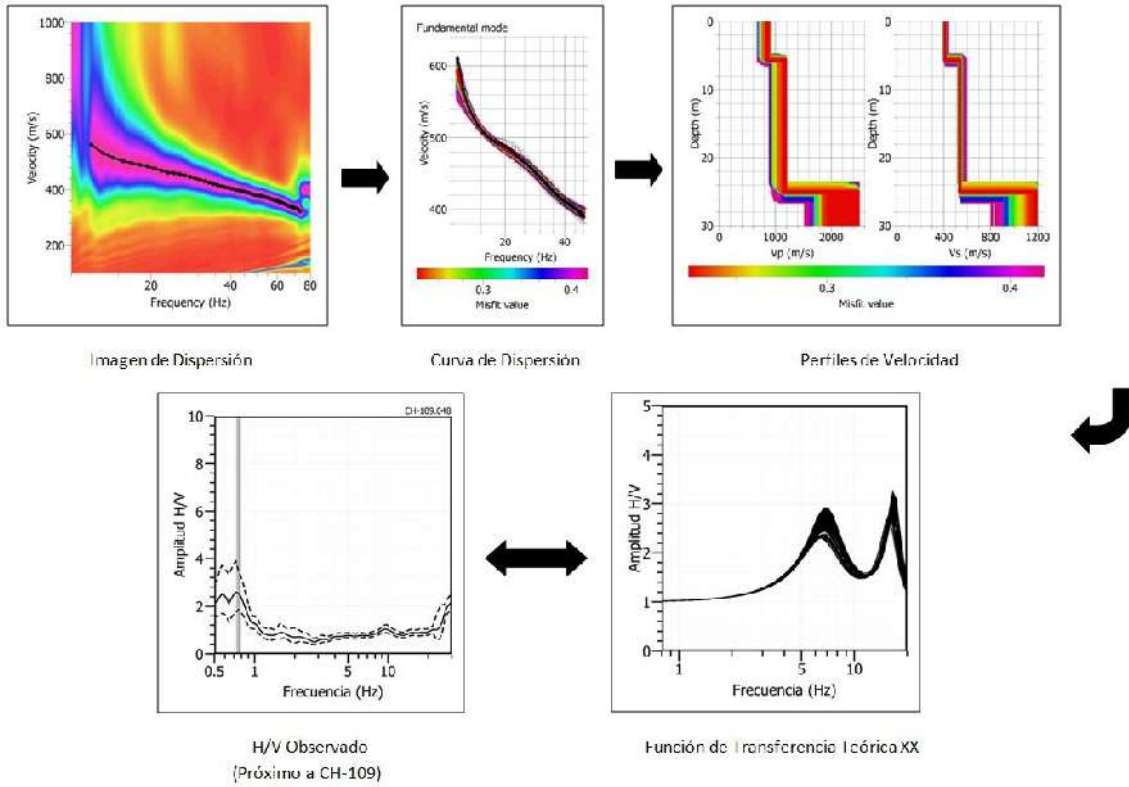


Figura 53e: ...Continuación.../ Resultados obtenidos para el perfil de resistividad L05-CH.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

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

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica

Para la ciudad de Chala se propone la siguiente Zonificación Sísmica-Geotécnica (Figura 54):

ZONA I: Conformada por estratos de origen ígneo cubiertos por un manto de origen aluvial poco consolidado y de poco espesor. A profundidad, el suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.2 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la Norma Sismorresistente peruana. Considerando velocidades de 400 m/s y 500 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores de 28 a 38 metros. Esta variación en el espesor es debido a la inclinación del terreno. La zona presenta una capacidad portante alta ($> 3.0 \text{ kg/cm}^2$). Por la cercanía al mar y geomorfología de la zona en estudio, los suelos de Chala responden también a periodos mayores (entre 0.6 y 1.8 segundos) pero con menor amplificación.

ZONA II: Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos a medios y suelos aluviales con espesores de hasta 12 metros. Subyaciendo a estos estratos se tiene material de origen ígneo y sedimentario. Esta zona considera el sector central del área urbana de la ciudad de Chala, donde los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.3 y 0.5 segundos, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la Norma Sismorresistente peruana. Esta zona presenta capacidad portante media que fluctúa entre 2 y 3 kg/cm^2 .

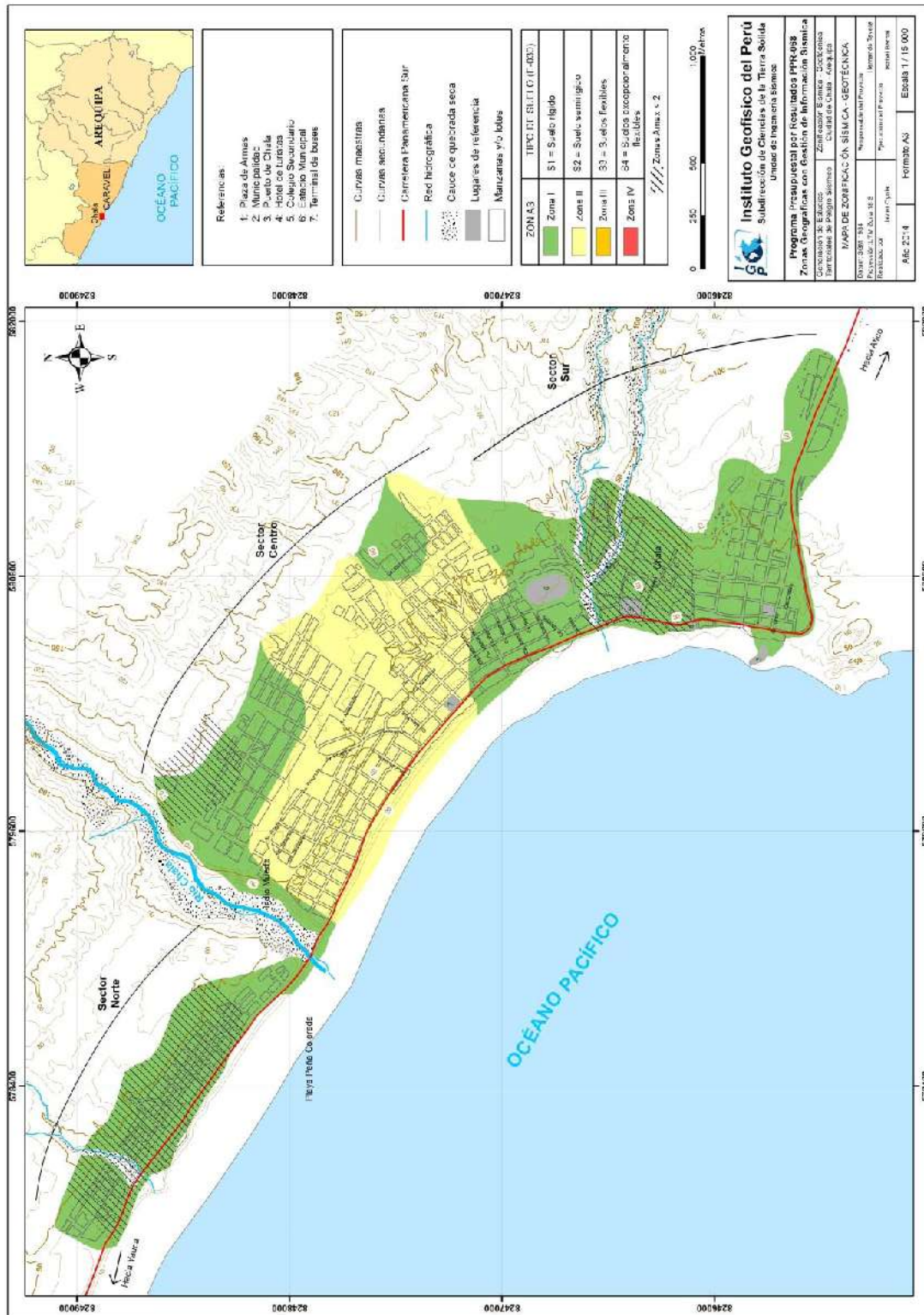


Figura 54: Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Chala.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

La ciudad de Chala se encuentra asentada sobre una terraza conformada por materiales heterogéneos de origen aluvional. El substrato rocoso corresponde a la formación Chocolate constituida por brechas volcánicas y lavas andesíticas; además, de algunos estratos de calizas y cuarcitas.

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

RECOMENDACIONES

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

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
- 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., Cistermas, 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.
- HartzeU, 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.
- 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.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, V-68, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña
- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology* 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.

- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- Tavera et al. (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.
- 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