

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

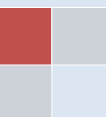
Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE CHIMBOTE Provincia de Santa – Departamento de Ancash (Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable: Hernando Tavera

**Lima – Perú
2014**



ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE CHIMBOTE

Provincia de Santa – Departamento de Ancash

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

Ejecución del Proyecto: ¹Isabel Bernal
²Juan Carlos Gomez
¹Hernando Tavera

Análisis e Interpretación: ¹Eliana Vizcarra
¹Fabiola Rosado
²Segundo Ortiz

Software SIG: ¹Rider Navarro
²Segundo Ortiz

Trabajos de Campo: ¹Henry Salas
¹Fabiola Rosado
¹Hernán Chávez
¹Dario Dueñas
¹Katia Vila
¹Rider Navarro
¹Luz Ojeda
²Robert Carrillo
²Mariana Vivanco
²Segundo Ortiz
²Abraham Gamonal

Sismología: Patricia Guardia
Cristóbal Condori

Simulación Tsunamis: Julio Martínez

Instrumentación Sísmica: David Portugal

¹Sísmica y Geofísica

²Geología y Geotecnia

PREÁMBULO

En la ciudad de Chimbote (Ancash) y alrededores, los estudios sobre la zonificación de suelos fueron promovidos por el Dr. Jorge Alva y su grupo de colaboradores del Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad de Ingeniería (CISMID - UNI) desde los años 70. Estos estudios se incrementaron después de ocurrido el sismo de mayo de 1970 (7.7 Mw) debido a que en dicha ciudad se desarrollaron importantes y complejos procesos de licuación de suelos, ampliamente estudiados por Morimoto et al. (1971). Posteriormente y desde un punto de vista geotécnico, el Dr. Alva realizó el estudio de los suelos a fin de buscar zonificarlos para su posterior comparación con los procesos observados en campo post-sismo de 1970. (Alva y Orihuela, 1982; Barrón, 1984; Ordoñez y Barrón, 1984; Alva y Parra 1991; Alva 2001). Estudios recientes consideran el informe elaborado por INADUR, dentro del programa Ciudades Sostenibles, orientado a elaborar mapas de peligros naturales y antrópicos a partir del desarrollo de metodologías de evaluación del peligro y de la vulnerabilidad que permitan definir una propuesta general de zonificación de suelos (INADUR, 2000).

Dentro del Programa Presupuestal N°068: Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres, el Instituto Geofísico del Perú ejecuta en el año 2013 el estudio “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Chimbote” y para ello realiza el reconocimiento geológico, geodinámico y geomorfológico de la zona, además de aplicar diversas técnicas de sísmica, geofísica y geotécnica para evidenciar el comportamiento dinámico de los suelos en la zona urbana de la ciudad. Este estudio permite complementar los iniciados por Alva y otros, considerando mayor información, nuevas metodologías e instrumental moderno. Finalmente, los resultados obtenidos han permitido disponer del Mapa de Zonificación Sísmica – Geotecnia para dicha ciudad, el mismo que refleja la situación geográfica actual de la zona urbana considerando que en los últimos 40 años, ha crecido aceleradamente llegando a ocupar áreas reconocidas como de alto riesgo.

Referencias:

- Alva, J. y Orihuela, P. (1982). Estudio de licuación y amplificación sísmica en Chimbote. IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Chiclayo, Perú.
- Alva, J. y Parra, D. (1991). Evaluación del potencial de Licuación de suelos en Chimbote, Perú. IX Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Universidad del Mar, Chile.
- Alva, J. (2011). Mapa de potencial de licuación de suelos en Chimbote mediante el método Grado-3 del TC-4. Proyecto Libro Digital PLD0004.
- Barrón, H. (1984). Vulnerabilidad sísmica en Chimbote. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Ingeniería.
- INADUR (2000). Mapa de peligros y plan de uso de suelos de la ciudad de Chimbote. INADUR, CEREN, PENUD, PER98/018.
- Marimoto, R., Kolzomi, Y., Matsuda, T., Hakumo, M., Yanaguchi, I. (1971). Seismic microzoning of Chimbote área, Peru. Overseas Technical Cooperation Agency, Government of Japan.
- Ordoñez, A., Barrón, H. y Alva, J. (1984). Vulnerabilidad sísmica de Chimbote y Huaraz. V Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Tacna, Perú.

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 Chimbote, distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Ancash. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Asimismo, se propone los posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de inundaciones por crecidas del río Lacramarca y por tsunamis.

Los resultados obtenidos para la Ciudad de Chimbote han permitido identificar, según el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de tres (3) zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S2, S3 y S4, esta última asociado a condiciones excepcionales.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Chimbote 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

3.1.- Fotointerpretación Multitemporal

4.- ANTECEDENTES

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

6.- CONDICIONES MECÁNICAS – DINÁMICAS DE SUELO: NORMA E.030

7.- METODOLOGÍA

7.1.- Estudios de Peligro Sísmico

7.2.- Monitoreo Sísmico

7.3.- Estudio de Tsunamis

7.4.- Estudios Geológicos y Geotécnicos

7.5.- Estudios Sísmicos y Geofísicos

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y TSUNAMI

8.1.- Sismicidad Regional

8.2.- Peligro Sísmico

8.3- Tsunamis

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA y GEODINÁMICA

9.1.- Geomorfología

9.1.1.- Pendientes

9.1.2.- Unidades Geomorfológicas

9.2.- Geología

9.2.1.- Rocas Volcánicas

9.2.2.- Rocas Intrusivas

9.2.3.- Depósitos Cuaternarios

9.3.- Geodinámica

9.3.1.- Movimientos en Masa

9.3.2.- Procesos Erosivos

9.3.3.- Inundación Fluvial

10.- GEOTECNIA

10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

10.2.- Capacidad Portante

10.3.- Nivel Freático Superficial

11.- SÍSMICA Y GEOFÍSICA

11.1.- Estudio Sísmico con la Técnica H/V

11.2.- Periodos Dominantes

11.3.- Estudios Sísmicos con la Técnica de Arreglos Sísmicos

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: Eventos Geodinámicos

ANEXO 2: Zonas Susceptibles a Inundación

ANEXO 3: Fichas y Perfiles de Calicatas y Exploración Manual

ANEXO 4: Mapas

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 2013 el Proyecto “Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica” y como parte del mismo, las Direcciones de Sismología y Geodinámica Superficial desarrollan la Actividad “Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico” a fin de obtener el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo) para las siguientes ciudades:

- *Ciudades de Chimbote y Nuevo Chimbote, distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Ancash.*
- *Ciudad de Huarmey, distrito de Huarmey, provincia de Huarmey, departamento de Ancash.*
- *Ciudad de Barranca, distrito de Barranca, provincia de Barranca, departamento de Lima.*
- *Ciudad de Huacho, distrito de Huacho, provincia de Huaura, departamento de Lima.*

De acuerdo a la historia sísmica del Perú, la región central 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 área urbana (Silgado, 1978). Al ser los sismos cíclicos, es de esperarse que en el futuro, las mismas áreas urbanas sean afectadas por nuevos eventos sísmicos con la misma o mayor intensidad. Entonces, no es tan importante el tamaño del sismo, sino la intensidad del sacudimiento del suelo, la educación de la población y la calidad de las construcciones presentes en cada área urbana

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 áreas urbanas 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 la construcción de estructuras adecuadas para cada

tipo de suelo. Dentro de este contexto, la población de las 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 sean bien construidas.

Estos tres aspectos permitirán tener la confiabilidad de que las estructuras sean sismorresistentes a un nivel determinado de sacudimiento del suelo.

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.

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 Chimbote ubicada en el distrito de Chimbote, provincia de Santa, departamento de Ancash (Figura 1). Asimismo, es de interés que las autoridades dispongan de un documento técnico que les ayude en el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo ante sismos y tsunamis, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de sus pobladores, así como proyectar hacia el futuro una adecuada expansión urbana.



Figura 1: Plaza de Armas de la Ciudad de Chimbote

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La superficie que actualmente ocupa la ciudad de Chimbote ha sido sucesivamente poblada por las culturas Moche, Wari, Recuay, Chimú e Inca. Recien en año 1774 en el libro *Introducción y Descripción de las Provincias pertenecientes al Arzobispado de Lima* por Cosme Bueno aparece por primera vez el nombre de Chimbote en un documento oficial. La referencia narra "...que la antigua Villa de Santa María de la Parrilla (Santa), tiene anexo un pueblecito de pescadores nombrado **Chimbote**". La etnografía refiere a estos primeros pobladores como pescadores procedentes del balneario de Huanchaco, al oeste de Trujillo, por lo que se les denominó *huanchaqueros*. Por otro lado, el historiador Enrique Olivera Arroyo indica que el nombre de Chimbote aparece en unos mapas elaborados por el corsario Basil Ringrose, en el año 1682, mapas se encuentran en National Maritime Museum de Londres.

Por los años 1871 comienza el crecimiento de la ciudad con la construcción de un ferrocarril hasta Huallanca. Al año siguiente, es nombrado Puerto mayor, por lo que se la dota de oficinas de aduana y portuarias. Posteriormente, en el año 1906 se crea el Distrito de Chimbote, el 6 de diciembre. En la década de los años 1930 se construye la Carretera Panamericana. En los años 50, se consolida la actividad portuaria con la constitución de la Corporación Peruana de Santa, la construcción de la central hidroeléctrica del Cañón de Pato y el inicio de actividades siderúrgicas. La pequeña población existente se incrementa con el auge de la industria pesquera, además de la llegada de comerciantes y servicios que hicieron al crecimiento de la ciudad caótico y desproporcionado de los planes.

En la década de los años 60, la economía decayó por la sobrepesca y contaminación ambiental, producto de la industria que agotó los cardúmenes de la costa, y factores climáticos como el fenómeno de El Niño y el terremoto de 1970. Entonces Chimbote ya se le venía una gran problemática. Sin embargo, durante los últimos años han sido notables los esfuerzos por la recuperación de la bahía y la remodelación de varios edificios y lugares públicos.

Chimbote es una ciudad de la costa norcentral del Perú, capital de la Nueva Provincia de Santa. Se ubica a orillas del Océano Pacífico en la bahía El Ferrol, en la

desembocadura del río Lacramarca. Según el INEI, la ciudad de Chimbote es la octava ciudad más poblada del Perú y se estima que al año 2014 alberga una población de 367.8503 habitantes. Es la ciudad más poblada de la Región Ancash (Figura 2).

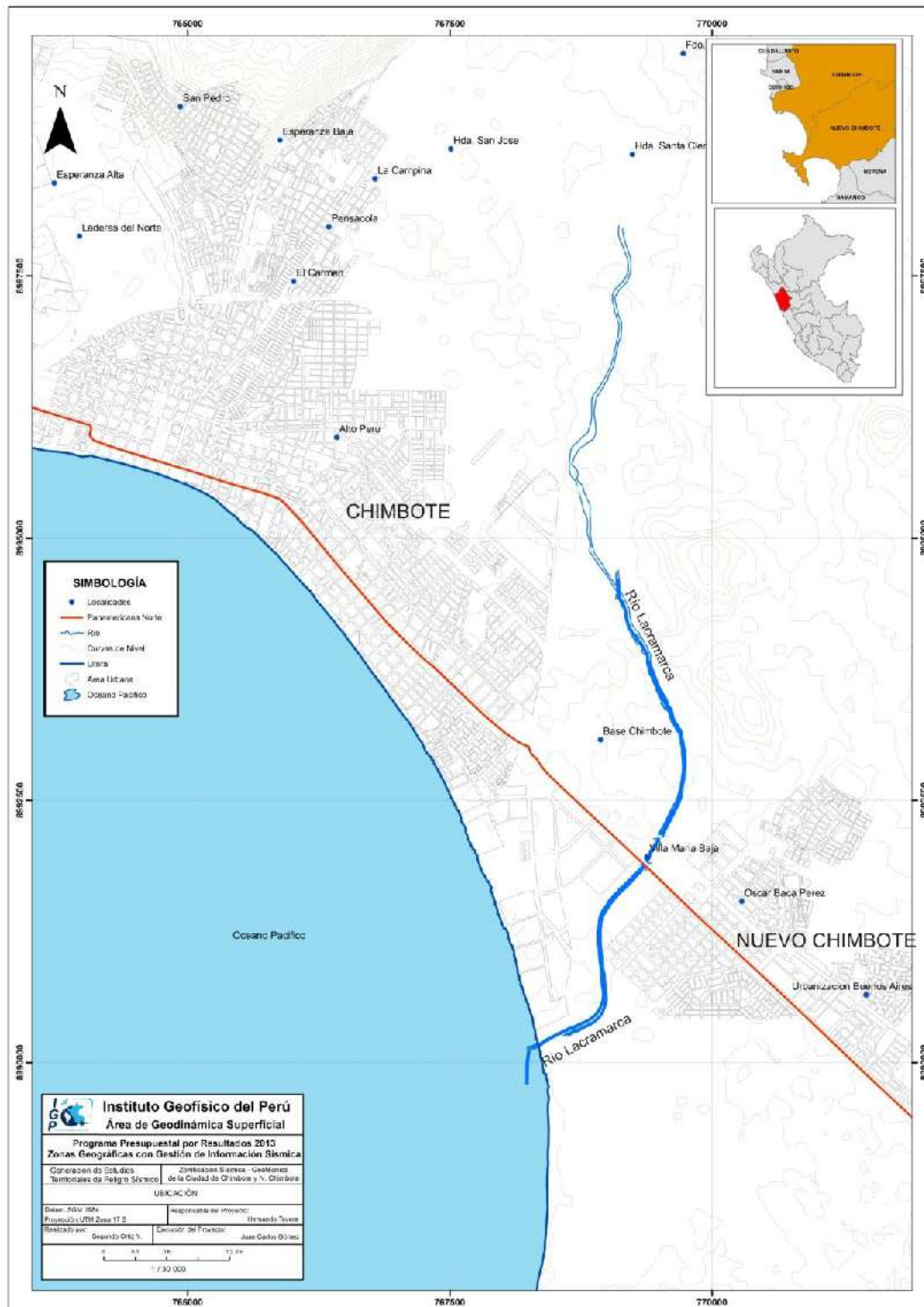


Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Chimbote, distrito de Chimbote y provincia de Santa, Departamento de Ancash

3.1.- Fotointerpretación Multitemporal

El análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales es un método que se ha utilizado para identificar, de manera visual, las zonas de expansión urbana como resultado del crecimiento del área poblada a lo largo del tiempo. Este análisis permite conocer y delimitar las zonas de expansión territorial a fin de considerarlas como apropiadas para el asentamiento de viviendas e infraestructura proyectada. Esta información será cuantificada con los resultados que se obtengan de los estudios de zonificación sísmica-geotécnica.

Este proceso tiene por objetivo analizar visualmente la evolución de las ciudades en un determinado lapso de tiempo con el objetivo de corroborar el crecimiento urbano rural de Chimbote y Nuevo Chimbote. Este análisis permite verificar en qué dirección se da el desarrollo urbano de la ciudad y corroborar sobre qué tipo de suelo se realiza, de tal forma que sirva como herramienta de orientación al futuro desarrollo urbano de la ciudad.

El análisis multitemporal, se realizó en base a fotografías aéreas del año 1961 (Instituto Geográfico Nacional), mapa catastral de la ciudad al año 2000 proporcionado por la Municipalidad Distrital de Chimbote e imágenes satelitales del servidor Digital Globe (Google Earth).

Del análisis de las fotografías aéreas del año 1961 (Figura 3), se observa que la ciudad de Chimbote tiene pocas áreas urbanas, todas ubicadas a lo largo del puerto y parte central del mismo. Asimismo, se observa la presencia de colinas cubiertas por arenas eólicas y un valle con amplios terrenos utilizados para la agricultura. En el mapa catastral del año 2014, -54 años después- Chimbote se pobló progresivamente en dirección NE, ocupando parte de las colinas y el valle. En la Figura 3, el área rectangular de color naranja considera al año 1961, terrenos eriazos y parte agrícolas, al presente, la zona se ha poblado dando lugar al surgimiento del distrito de Nuevo Chimbote.

En la Figura 4 se muestra el mapa catastral para el año 2000 (Google Earth) y en ella se indica, con áreas de color amarillo las correspondientes al crecimiento de la ciudad hasta el presente, siempre sobre las colinas circundantes y terrenos agrícolas. Hacia el sur, se construyeron el Estadio y el Terminal Terrestre llegando a invadir la llanura aluvial del río Lacramarca.

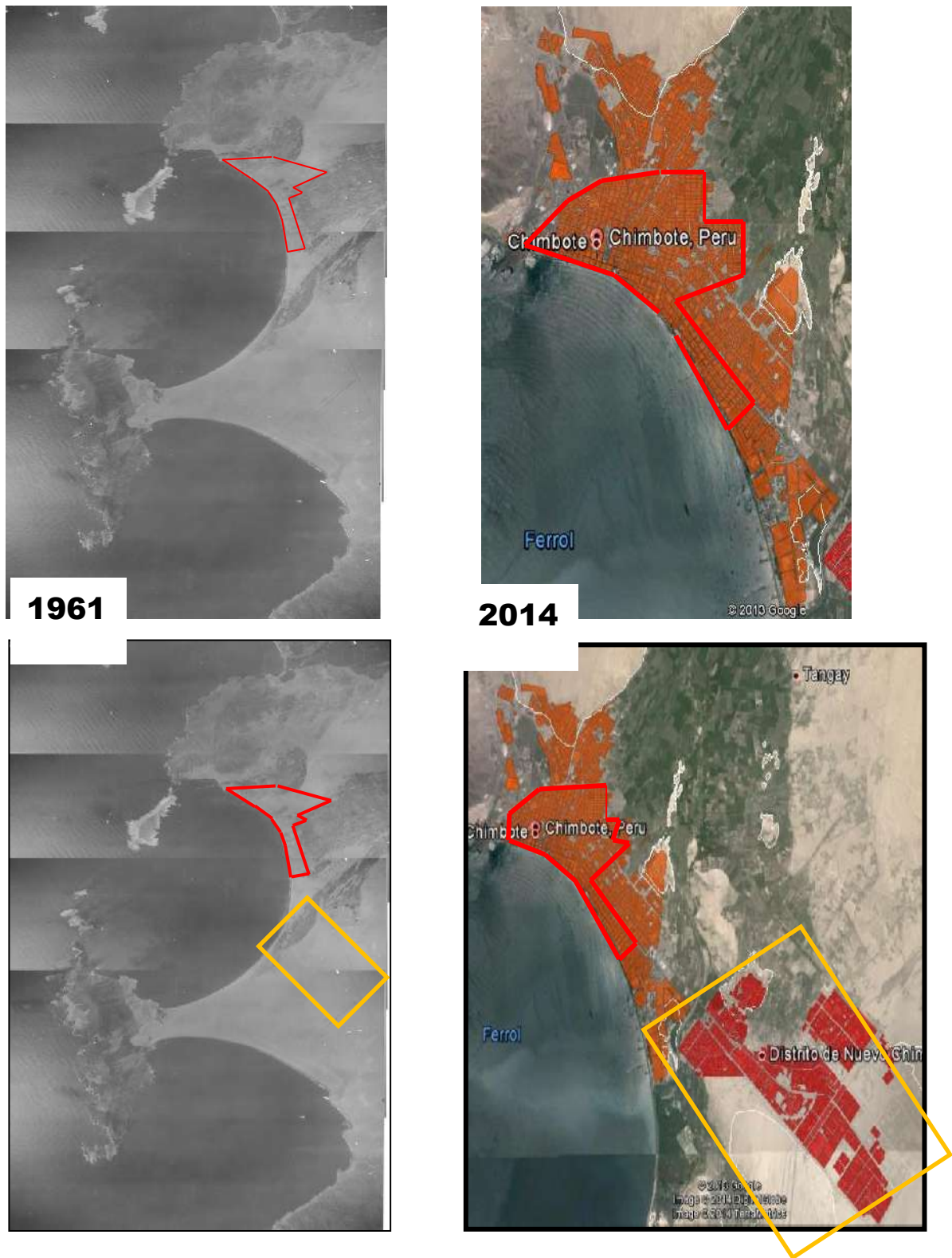


Figura 3: Comparación entre las áreas pobladas en Chimbote para los años 1961 y 2014. Los mapas muestran que es factible cuantificar el crecimiento de la ciudad. El área rectangular de color naranja, correspondía a un terreno eriazos y al presente, completamente urbanizado.

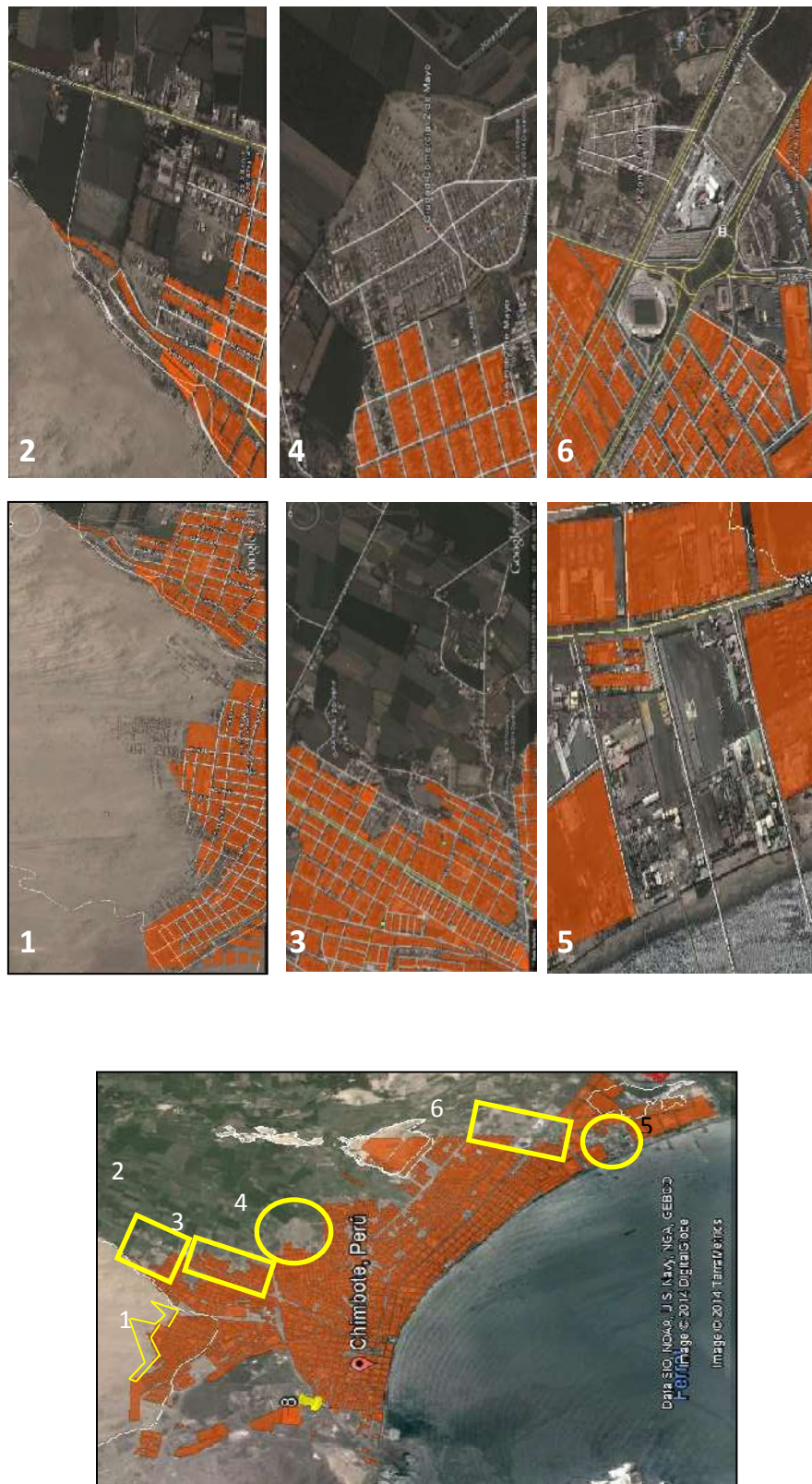


Figura 4.:La imagen de inferior muestra el área poblada en la ciudad de Chimbote para el año 2000. Las áreas de color amarillo indican la dirección en la cual se ha realizado la expansión de la ciudad. En la imagen superior, se muestra las áreas pobladas al 2014.

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 que propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales (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 las 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 son construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y, mucho menos, respetando la norma de construcción vigente (Norma E.030). Asimismo, en algunas ciudades las viviendas se asientan en laderas de cerros, ríos, cauces de quebradas secas y zonas de terrazas inundables sin medir su vulnerabilidad e incrementando el riesgo en dichas zonas.

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

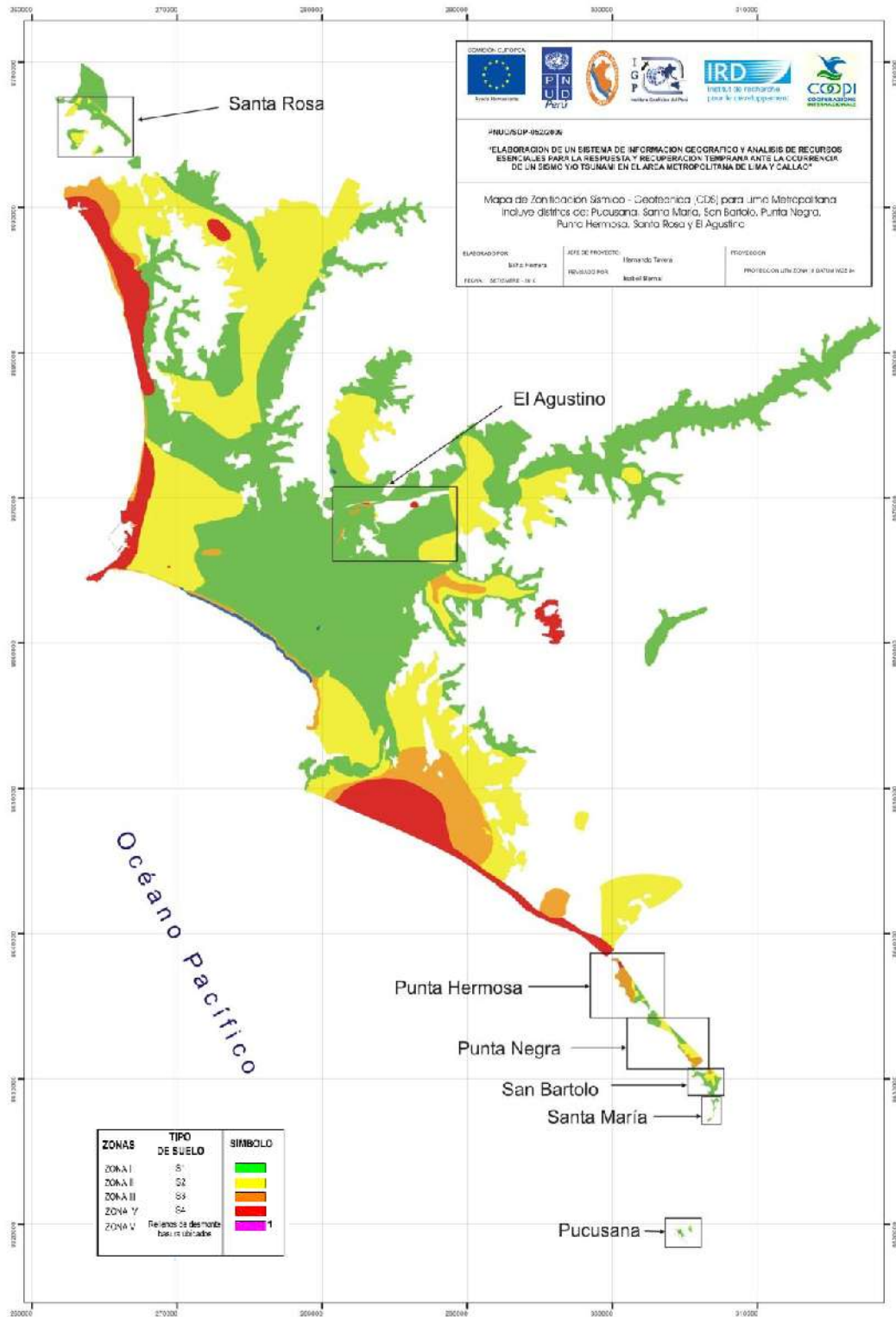


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

A partir del año 2012 y dentro del Programa Presupuestal por Resultados N°068 “Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres”, el Instituto Geofísico del Perú (IGP) continúa con la realización de los estudios de Zonificación Sísmica-Geotécnica para las áreas urbanas de Chosica, Chaclacayo, Huaycán y Carapongo.

En el año 2013, el IGP realiza estudios similares en las ciudades de Chimbote, Huarmey, Barranca y Huacho, a las cuales se añadió la componente de peligro de tsunamis por contar, todas estas ciudades, con zonas de playa y viviendas cerca de la zona costera. **Los resultados obtenidos para la Ciudad de Chimbote son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Chimbote”.**

5.- CONDICIONES LOCALES DE SITIO

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio, es 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 condiciones geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas y geofísicas de las zonas en estudio y que en conjunto, controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un sismo.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica-geotécnica y el resultado se constituye como una de las herramientas más importantes orientadas a minimizar los daños producidos por 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, inundación 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.- CONDICIONES MECÁNICAS-DINÁMICAS DE SUELOS: NORMA E.030

En el Perú, la construcción de obras civiles de cualquier envergadura debe considerar las indicaciones contenidas en el Reglamento Nacional de Construcción o Norma E.030 (2003). Básicamente, esta norma considera la clasificación de los suelos en función de sus propiedades mecánicas, espesor de estrato, periodo 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 500 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 el Código de Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Construcciones (Norma E.030, 2003). 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 E.030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales).

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

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y el número de pisos de 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, para zonas firmes de la ciudad de México el valor de λ es igual a 10 (Muria y Gonzáles, 1993); mientras que, para Lima es de 25 (Guiller et al. 2014). 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 Chimbote se ha realizado con información recolectada en campo y la aplicación de diversas metodologías que se detallan a continuación.

7.1.- Estudios de Peligro Sísmico

Considera, en términos de probabilidad, conocer la severidad sísmica o aceleración con la cual podría ser sacudida un área en un determinado lapso 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).

7.2.- Monitoreo Sísmico

Se ha realizado la instalación de 8 estaciones acelerométricas de tres componentes de registro y formato digital en las ciudades de Chimbote, Huarney, Barranca y Huacho. En la ciudad de Chimbote, se ha instalado una estación Acelerométrica en el Cerro Cruz de la Paz (Figura 6). Esta estación está en operación y viene registrando importante información sísmica local y regional que permitirá conocer la respuesta del suelo ante la ocurrencia de sismos de magnitud moderada y alta. En la actualidad esta estación es parte de la Red Acelerométrica Nacional a cargo del IGP.



Figura 6: Estación Acelerométrica en el Cerro Cruz de la Paz.

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 Chimbote (Figura 7). 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 7: Vista panorámica de la Bahía de Chimbote considerada en el modelado de tsunamis

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. Las técnicas de análisis son:

.- Técnica de Levantamiento Geológico y Geomorfológico. Considera el desarrollo de trabajos de campo orientados a recopilar información sobre las características geológicas y geomorfológicas de carácter local (Figura 8), considerando bases de

datos topográficos, de pendientes, drenajes, litología, uso de suelos y de áreas susceptibles a deslizamientos y/o flujos.



Figura 8: Imagen del terreno sobre el cual se ha realizado el trabajo geológico y geomorfológico en la ciudad de Chimbote

.- **Técnica de 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 del río Lacramarca.

.- **Técnica de Análisis Geotécnico:** Se establece la construcción de 14 calicatas para la obtención de muestras de suelo a fin de realizar análisis como el granulométrico, límites de elasticidad, contenido de humedad y corte directo (capacidad portante). Las calicatas tuvieron dimensiones de 1.5 m x 1.5 m de lado x 3.0 m de profundidad máxima. Las muestras se obtuvieron de la capa más profunda y representativa del tipo de suelo en el sitio evaluado. Con la primera muestra de suelo obtenida se realizaron los análisis granulométricos, límites de elasticidad y contenido de humedad, y con ello se procedió a realizar la clasificación de los suelos haciendo uso del Código SUCS (Clasificación Unificada de Suelos) para el total de los puntos de muestreo.

La clasificación SUCS 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 fue utilizada para el análisis de corte directo que consiste en 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.

.- **Técnica de H/V:** considera como hipótesis de base que las vibraciones ambientales o microtemores generadas por la actividad humana se deben principalmente a la excitación de las capas superficiales al paso de ondas superficiales del tipo Rayleigh. El registro de esta información y su interpretación, permite conocer el periodo natural de vibración del suelo y el factor de amplificación, parámetros que definen su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de eventos sísmicos. Estos resultados son correlacionados y complementados con los obtenidos de los estudios geofísicos, geológicos, geomorfológicos, geodinámicos y geotécnicos. Para los registros de vibración ambiental se utiliza el equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores de tres componentes de registro tipo Lennartz (Figura 9).



Figura 9: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 10, 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-1 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en CH-332, presenta diversidad de pulsos de variada amplitud, que al momento de su análisis, pueden ser filtrados, para no afectar a la información a utilizarse en el estudio.

Con la información disponible, se procede a construir las razones espectrales H/V (registros de las componentes horizontales / registros en la componente vertical) a fin de identificar las frecuencias predominantes y amplificaciones relativas que caracterizan al tipo de suelo presente en el área de estudio (ver Figura 11), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor,

geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

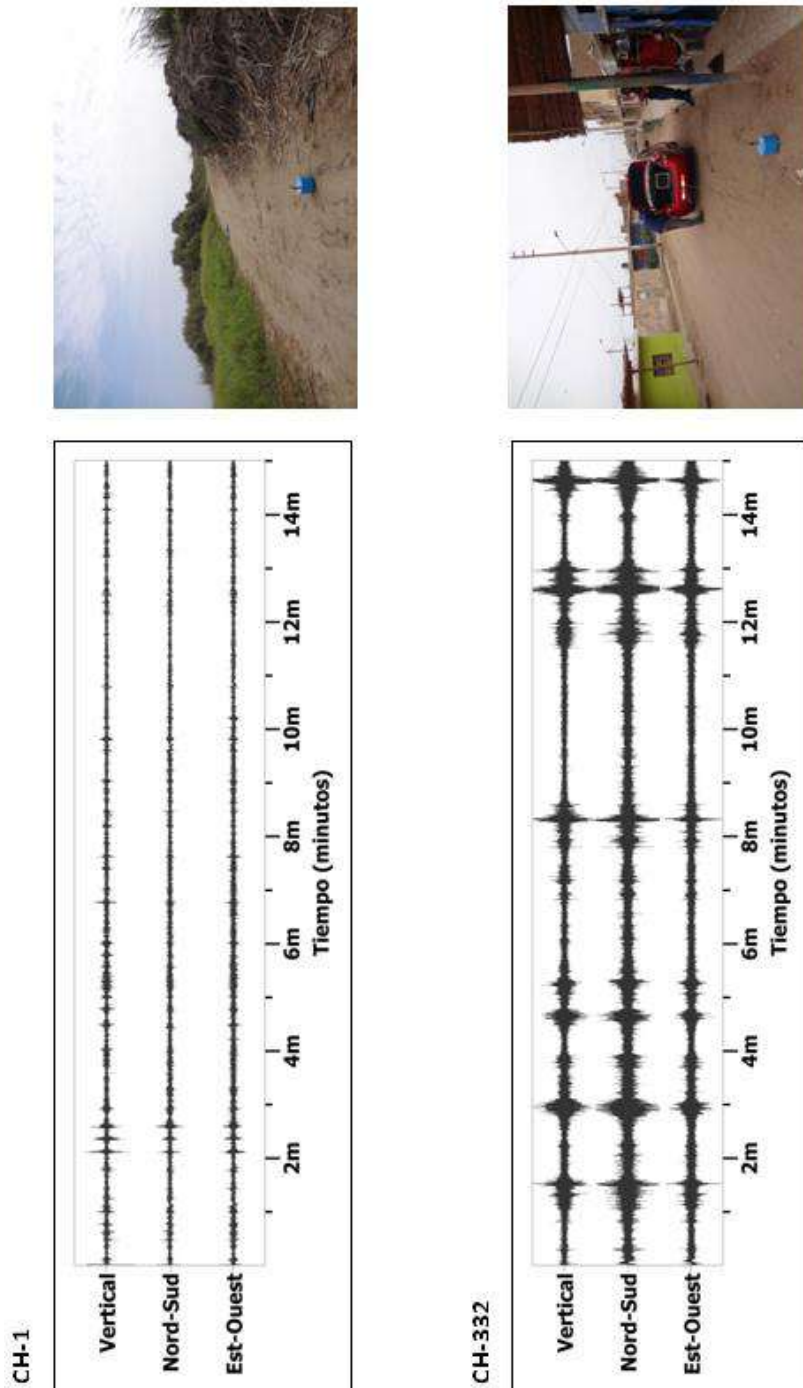


Figura 10: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona libre de ruidos de fondo (CH-1) y otro con ruido aleatorio (CH-332). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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

- Los registros de vibración ambiental son tratados por ventanas 20 segundos de señal no perturbada por el ruido de fondo. Para tal efecto, se selecciona de manera aleatoria, diversos tramos de señal sin la presencia de ruidos transitorios.
- Se calcula la Transformada Rápida de Fourier para un número mayor a 10 ventanas de observación para cada punto.
- Los espectros horizontales de la señal se divide entre el espectro vertical para obtener la relación H/V y luego se promedia los valores para cada punto de observación, considerando su respectiva desviación estándar (Figura 11). Luego se procede a identificar la frecuencia predominante considerando, como condición, presentar una amplificación relativa mayor a 2 veces.

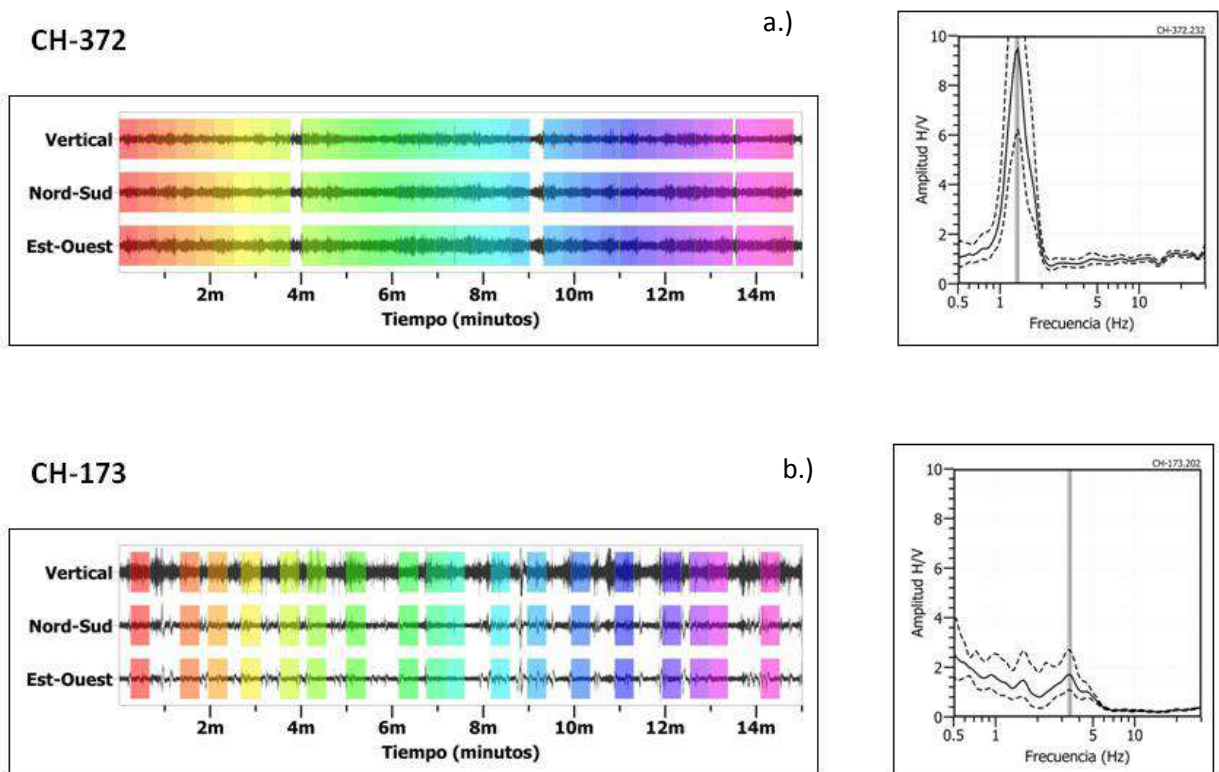


Figura 11: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) y gráficos de H/V. **a)** Registros y razones H/V donde se identifican frecuencias predominantes, **b)** Registros y razones H/V en los cuales la frecuencia predominante presenta menor amplitud. Las líneas gruesas en los gráficos H/V indican el promedio de las curvas de razones espectrales y las líneas discontinuas su desviación estándar.

Para definir la frecuencia predominante se consideraron tres criterios (Lermo y Chávez-García -1994 a,b; Lachet y Bard, 1994): primero, debe estar presente en un rango de interés que fluctúa entre 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.



Figura 12: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica en la ciudad de Chimbote

.- **Técnica 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 12). 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 cambio de las propiedades físicas de los materiales que la conforman, permitiendo de este modo, definir el perfil de

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

.- **Técnica 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 13).



Figura 13: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y TSUNAMI

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

8.1.- Sismicidad Regional

El borde occidental del Perú, se constituye como la principal fuente generadora de sismos y tsunamis, siendo los de mayor magnitud los que han causado grandes niveles de daños y pérdidas de vidas humanas. Dentro de este contexto, el borde occidental de la región central presenta actividad sísmica de tipo superficial (profundidad menor a 60 km) e intermedia (profundidad entre 61 y 350 km), siendo los primeros de mayor peligro debido a que frecuentemente alcanzan magnitudes elevadas y al tener sus focos cerca de la superficie, producen daños y efectos importantes en las ciudades costeras (Figura 14). Una de estas ciudades es Chimbote y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1940 (8.0Mw), 1966 (7.5Mw), 1970 (7.7Mw) y 1974 (7.5Mw) los que causaron mayores niveles de daño en la ciudad, principalmente en construcciones precarias de adobe y quincha, además de algunos escenarios de licuación de suelos. En la Figura 15, se presenta el mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de Mayo de 1940, el de mayor magnitud ocurrido en los últimos 100 años en el borde occidental de la costa central del Perú. La máxima intensidad evaluada en la ciudad de Chimbote fue de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Los otros sismos importantes produjeron en la ciudad intensidades entre V y VII (MM), con daños y efectos puntuales en viviendas de adobe y quincha. Los tsunamis producidos por estos eventos sísmicos no causaron daños importantes en la zona costera, básicamente debido a la poca altura de sus olas (<3 metros) y a la escasa población allí existente en los años en los cuales ocurrieron.

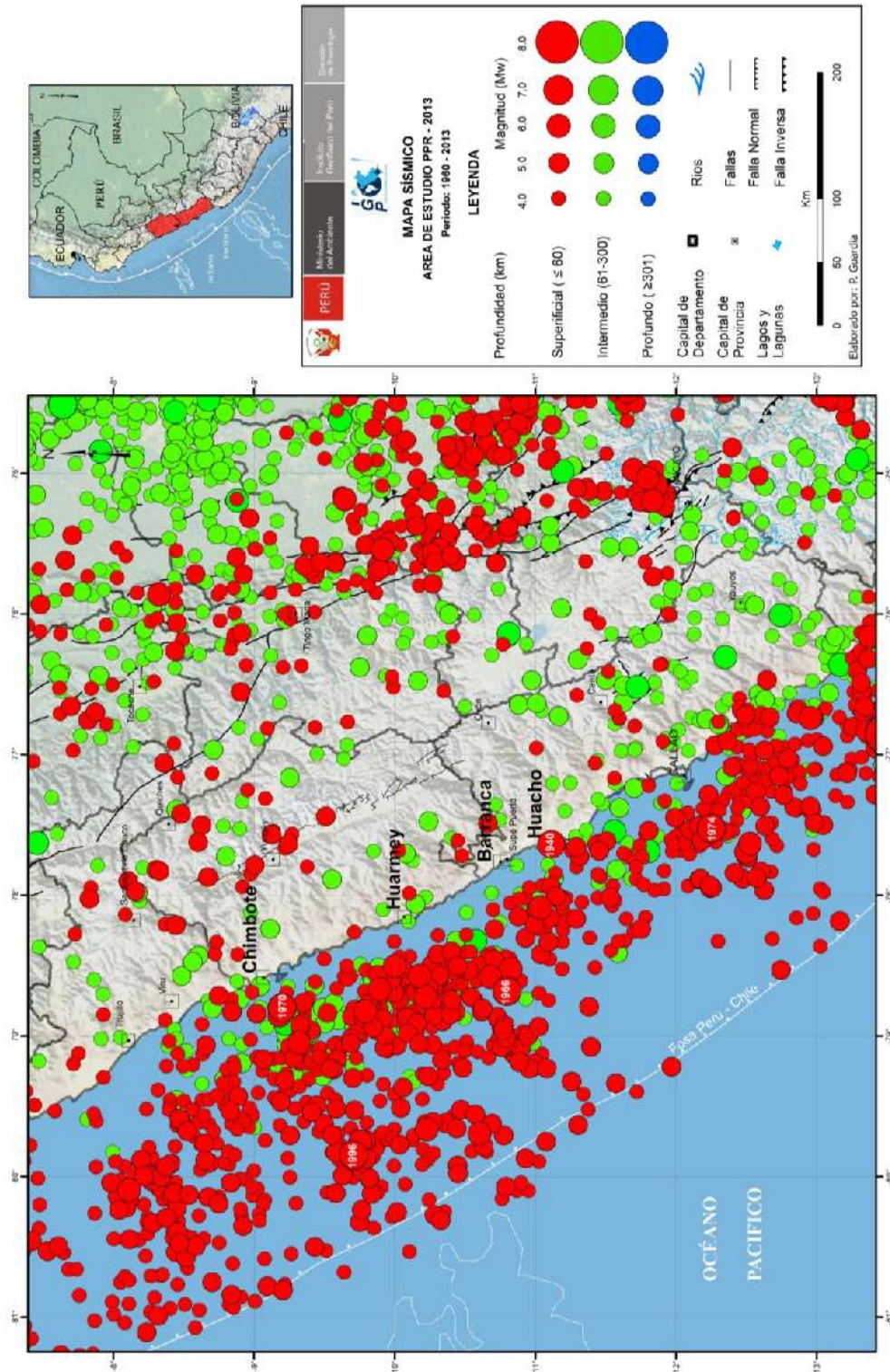


Figura 14: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región central del Perú. Los sismos de mayor magnitud están indicados por el año de ocurrencia dentro de los círculos mayores.

Es importante remarcar que en los años en que ocurrieron los sismos y tsunamis antes indicados, la situación geográfica y demográfica de la ciudad de Chimbote fue menor y a la fecha, debido a su crecimiento acelerado, la población se ha asentado sobre terrenos agrícolas, en las cercanías del río Lacramarca y zonas de playa, lo cual ha incrementado su riesgo ante la posible recurrencia de sismos y tsunamis.

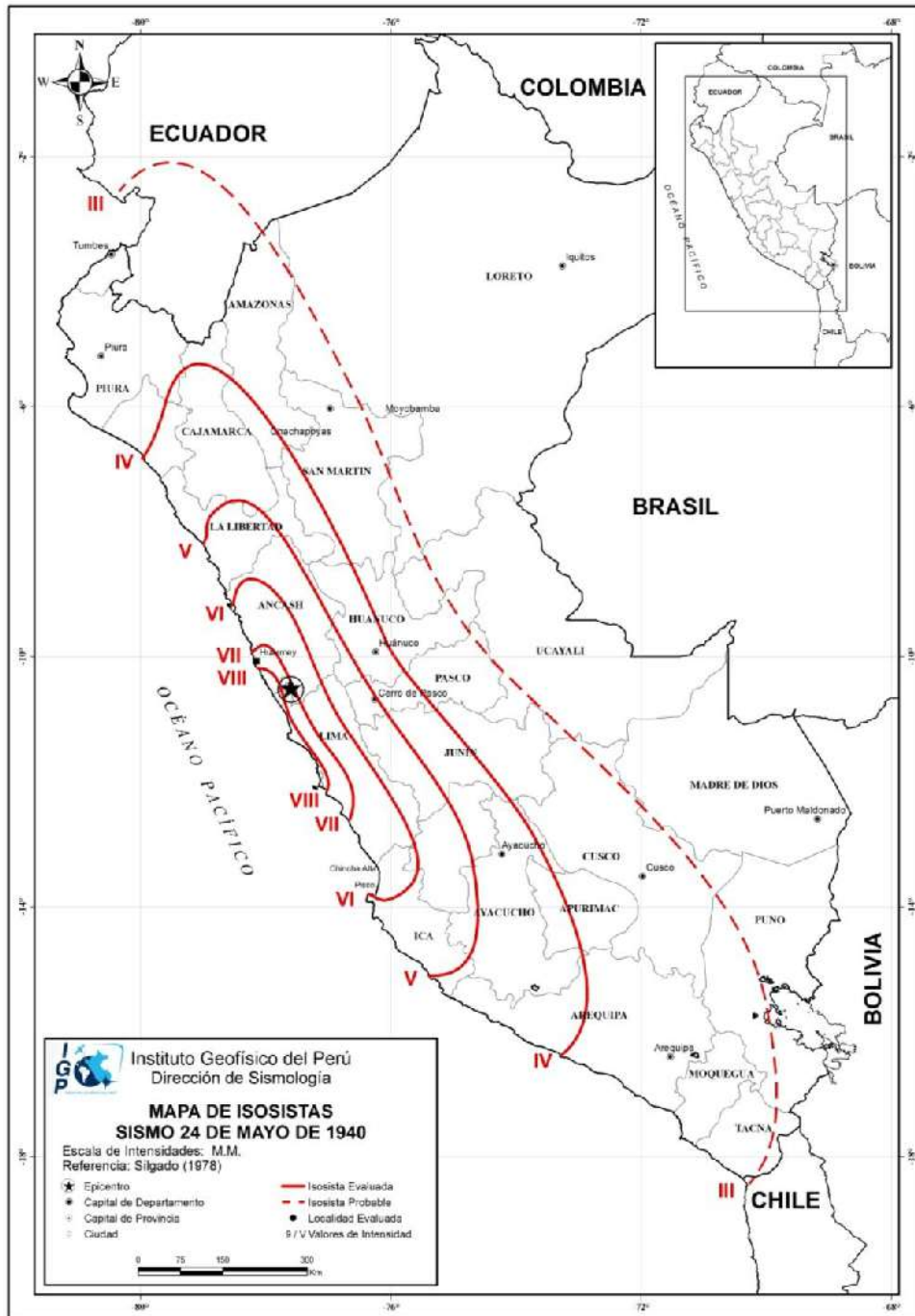


Figura 15: Mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de mayo de 1940 (8.0Mw). En la ciudad de Chimbote las intensidades fueron el orden de VI en la escala de Mercalli Modificada.

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., 2012), 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 de estudio se obtiene, para un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia, valores de aceleración entre 340 a 420 gals (Figura 16), equivalentes a intensidades del orden de VII-VIII (MM); es decir, suficientes como para producir daños estructurales, deslizamientos y posibles escenarios de licuación de suelos en la ciudad de Chimbote, tal como ocurrió con el sismo de 1970.

8.3.- Tsunamis

La información histórica sobre tsunamis ocurridos en la región central del Perú y que afectaron, en diferente grado, a las zonas costeras es bastante numerosa. En la Tabla 1 se presenta la relación de sismos que produjeron tsunamis contenidos en el catálogo sísmico del Perú. Estos sismos presentaron magnitudes superiores a 7.0 Mw y produjeron niveles de intensidades en la zona epicentral del orden de VII (MM) a más. En general, los tsunamis afectaron a la zona costera del Callao con olas de hasta 7 metros de altura. Para el caso del tsunami del año 1687, olas de 10 metros de altura causaron efectos importantes en los puertos y localidades de Callao, Chancay y Chimbote. Por otro lado, el tsunami de 1746, con olas de hasta 24 metros causó destrucción en Callao y puertos de Chancay y Huacho dejando muchas embarcaciones varadas; además de daños en edificaciones aledañas a la zona costera. El tsunami de 1974, con olas del orden de 3 metros, inundó varias fábricas pesqueras en las bahías de Chimú, Chancay y Tortugas al norte de Lima, destruyendo muelles y zonas de cultivos. La copiosa información histórica no señala daños en la zona costera de la ciudad de Chimbote, debido probablemente a la no existencia de obras y/o poca población en sus cercanías para los años en que estos peligros se hicieron presentes.

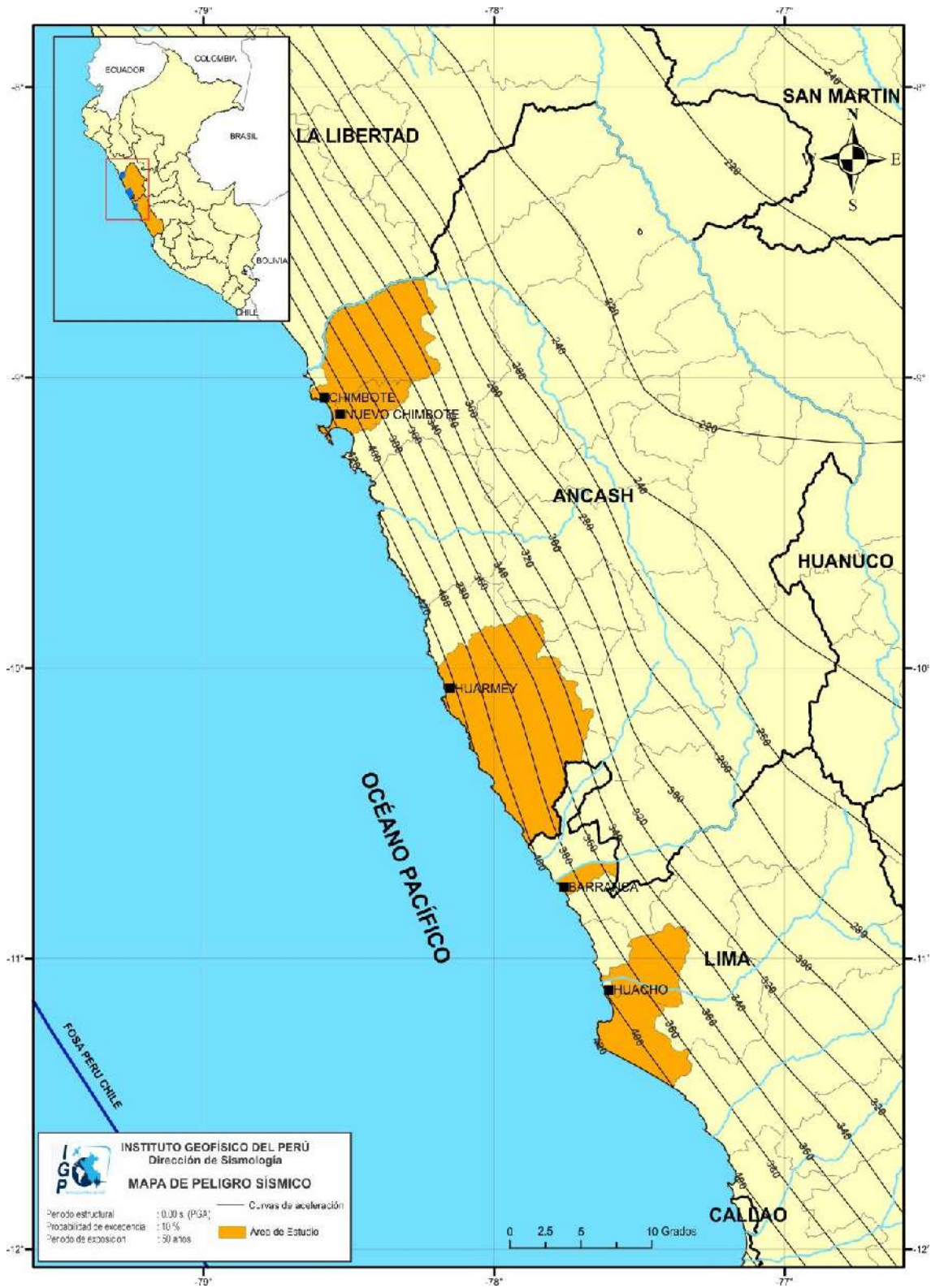


Figura 16: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Tabla 1: Parámetros epicentrales de los principales sismos tsunamigénicos que han afectado la costa de la región central del Perú (Silgado, 1987)

Fecha	Hora Local	Latitud S	Longitud W	Magnitud Mw	Intensidad Mercalli
1586, Jul 09	19:30	12.1	77.0	8.6	X
1678, Jun 16	20:45	12.3	77.8	7.7	IX
1687, Oct 20	05:30	13.2	76.5	8.6	X
1690, Nov 20	13:30	12.6	77.0	7.2	VI
1746, Oct 28	22:30	12.0	77.2	9.0	X
1806, Dic 01	-	12.0	78.0	-	VII
1868, Ago 13	17:46	18.3	70.6	8.6	VII
1974, Oct 03	09:21	12.3	77.5	8.1	IX

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

.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de las cartas 2123 y 2124 adquiridas 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 obteniéndose una resolución espacial de 30 metros.

.- Modelo de fuente sísmica: Se considera como escenario un sismo de magnitud 8.5 Mw con epicentro frente a la zona costera de Chimbote y sus parámetros, así como la orientación de la fuente sísmica, fueron tomados del promedio de los valores correspondientes a los sismos de 1966 y 1974. 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 tsunamis 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.

En la Figura 17 se muestran los resultados obtenidos para la zona costera de la ciudad de Chimbote y ellos indican que la primera ola del tsunami llegaría en un tiempo entre 23 a 25 minutos después de ocurrido el sismo. Esta ola tendría alturas del orden de 6 metros en las Bahías de Chimbote y Samanco.

Por otro lado, en la Figura 18 se presenta el mapa de niveles de inundación horizontal, tierra dentro con respecto a la línea de costa, y en ella se observa que el tsunami alcanzaría distancias de 2 km prácticamente en ambas Bahías: Chimbote y Samanco. De acuerdo al escenario propuesto, a la altura de la playa Anconcillo, las dos bahías estarían en comunicación debido a la inundación. Estos resultados confirman la hipótesis que la geomorfología de la zona costera controla el comportamiento de los tsunamis en zonas costeras.

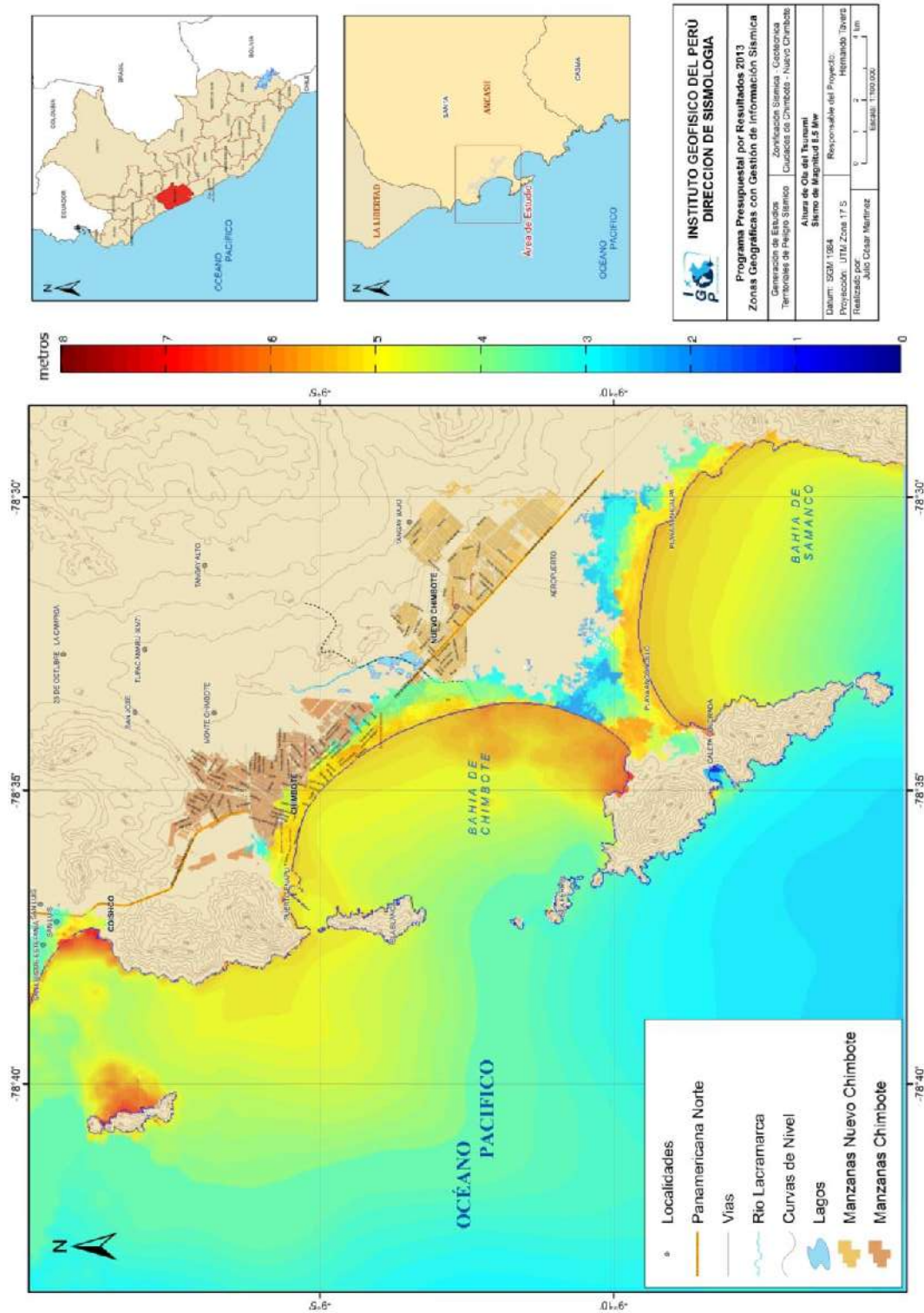


Figura 17: Mapa de altura de ola de tsunami en la zona costera de la ciudad de Chimbote.

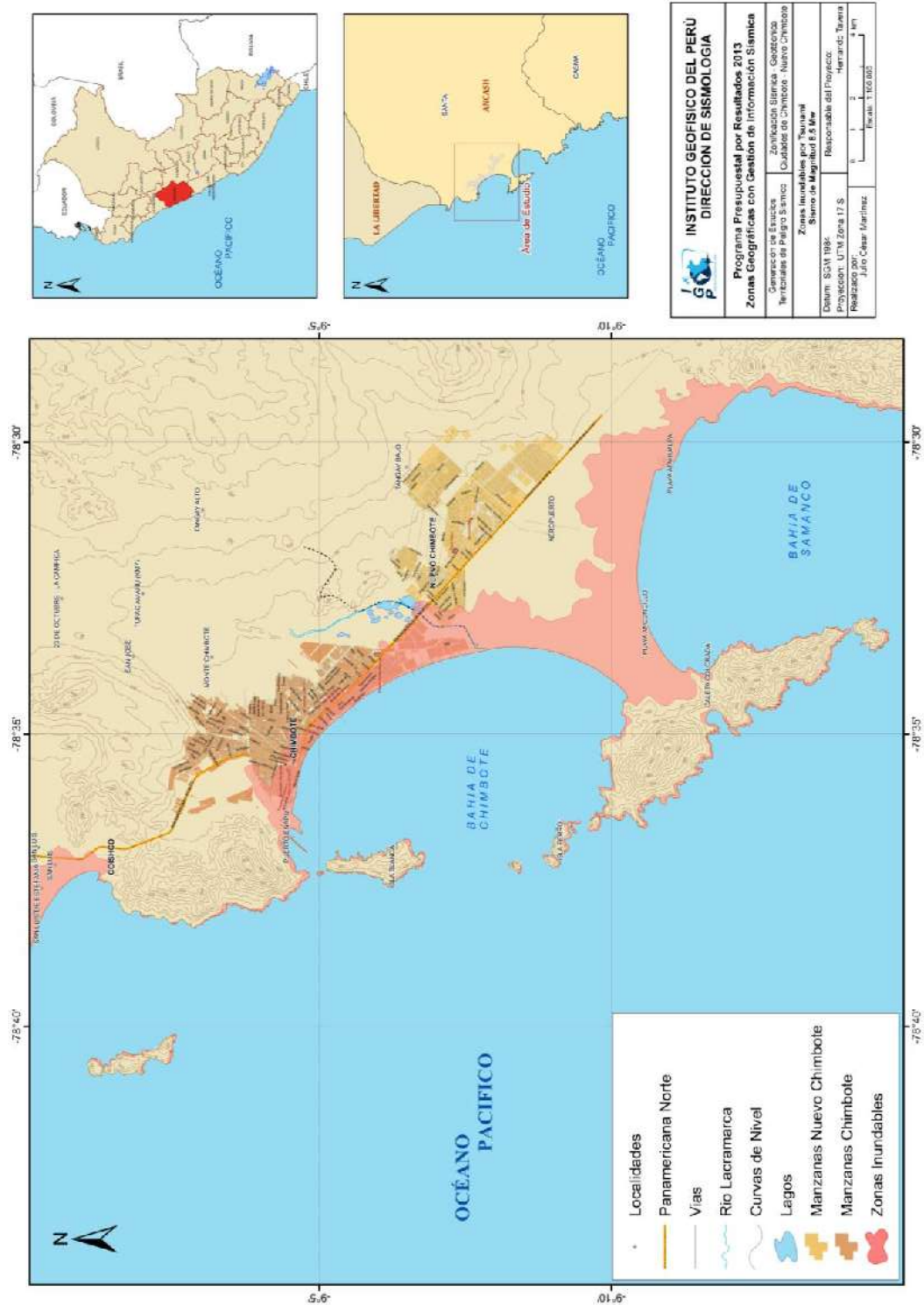


Figura 18: Mapa de niveles de inundación horizontal en la zona costera de la ciudad de Chimbote.

9.- GEOMORFOLOGÍA, GEOLOGÍA Y GEODINÁMICA

Para los estudios geomorfológicos, geológicos y geodinámicos, se ha hecho uso de la base topográfica digital a escala 1/100,000 adquiridos del Instituto Geográfico Nacional (IGN), la misma que fue complementada con la topografía digital obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación (MED) con una resolución de 30 metros (www.astergdem.com). La información es georeferenciada en el SIG considerando el sistema UTM y datum WGS 84, Zona 18-S.

9.1. Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos presentes en el área de estudio son el resultado del modelado geológico causado por eventos tectónicos y procesos de geodinámica superficial. Para la identificación de las distintas geoformas presentes en el área de estudio se ha considerado el Modelo Digital del Terreno (MDT) y el mapa de pendientes. En base al MDT (Figura 19), la ciudad de Chimbote se asienta sobre la llanura aluvial rodeada de colinas cubiertas por arenas eólicas con altitudes del orden de 80 m.s.n.m., estando las zonas de menor elevación ubicadas en la zona costera con capas de arenas con conchuelas. En el extremo sur de la ciudad existen capas gruesas de arenas eólicas recientes.

9.1.1.- Pendientes

El mapa de pendientes permite identificar las distintas geoformas presentes en el terreno en base a la aplicación del algoritmo Spatial Analyst del software SIG, usando como archivo fuente el MDT generado para el área de estudio. La ciudad de Chimbote se encuentra asentada sobre un valle cuya superficie presenta pendientes del orden de los 10° (Figura 20).

9.1.2. Unidades Geomorfológicas

Las ciudades de Chimbote y Nuevo Chimbote se encuentran emplazadas sobre una superficie de variada topografía y ambos costados del mayor afluente hídrico de la zona, el río Lacramarca. En este escenario, es posible reconocer las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 21):

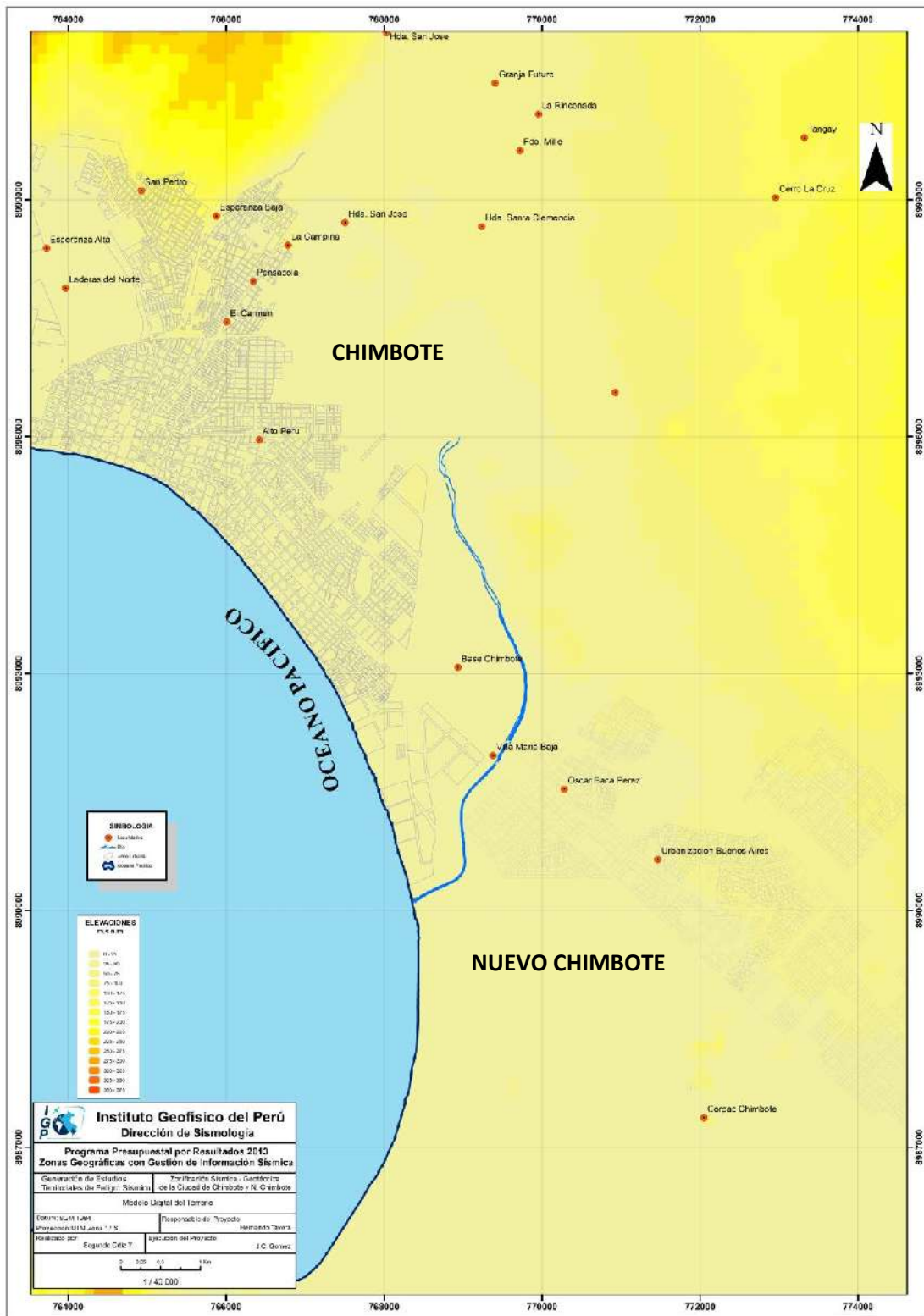


Figura 19: Mapa del modelo digital del terreno (MDT) para las ciudades de Chimbote y Nuevo Chimbote

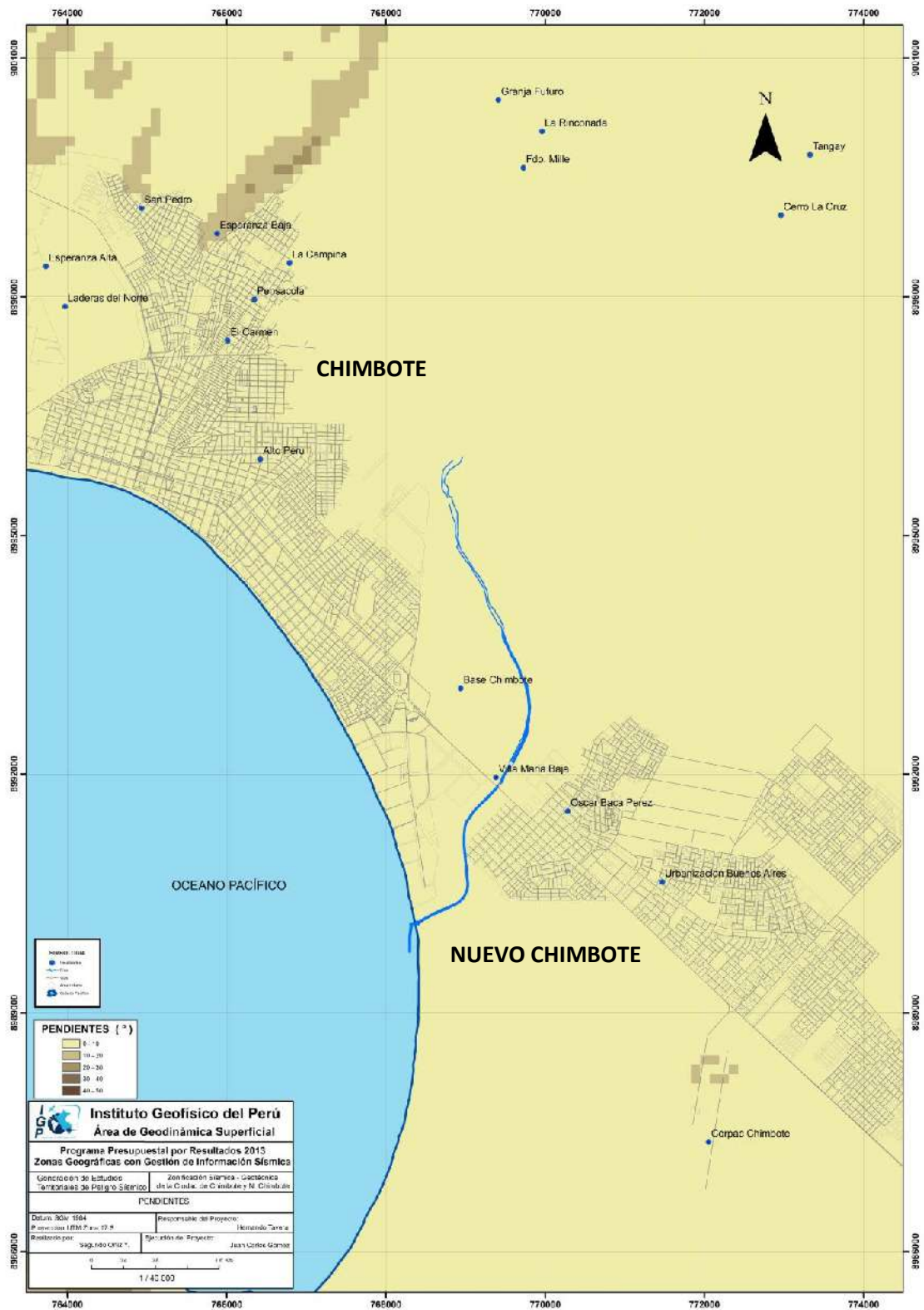


Figura 20: Mapa de pendientes para las ciudades de Chimbote y Nuevo Chimbote

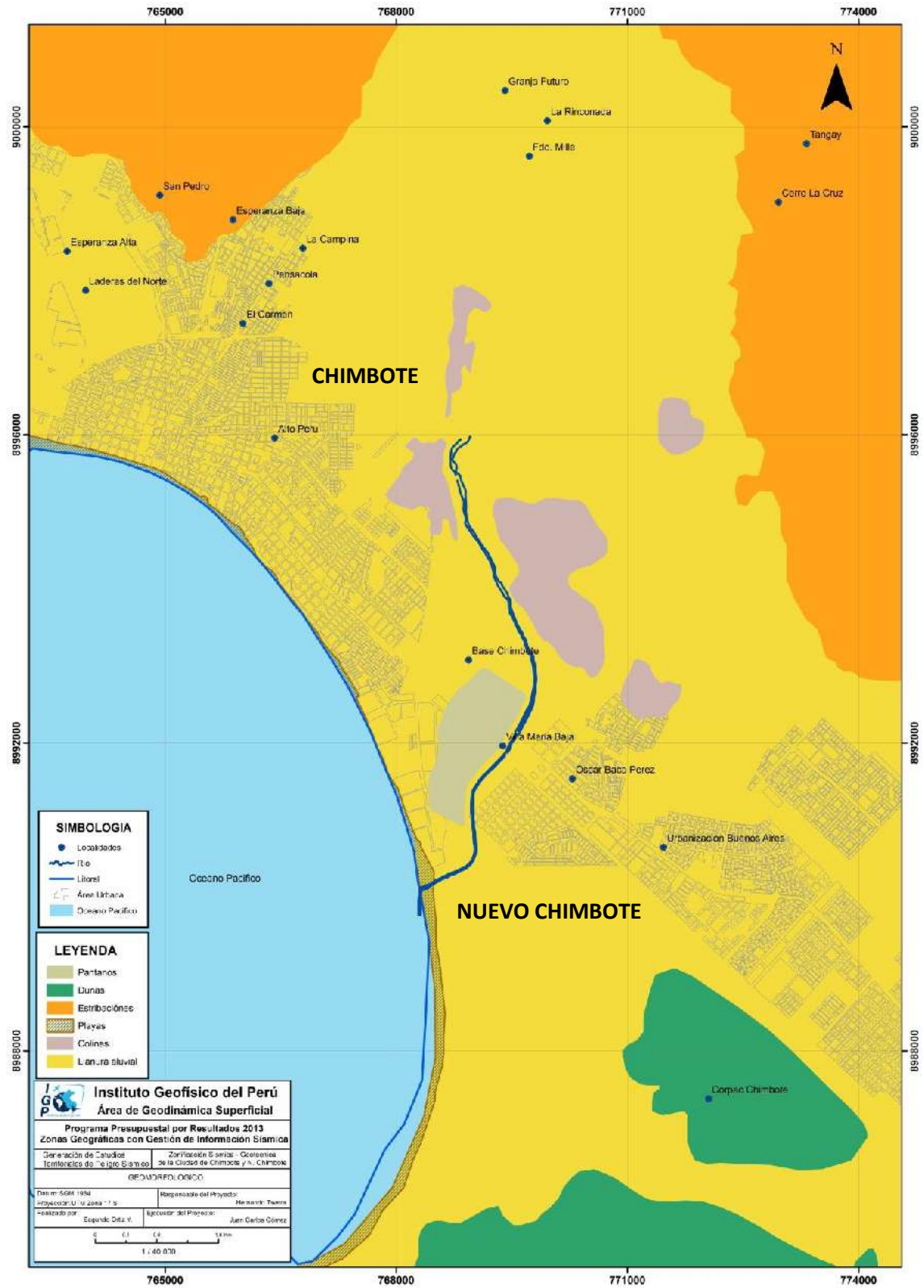


Figura 21: Mapa geomorfológico de las ciudades de Chimbote y Nuevo Chimbote

.- **Llanura Aluvial:** Es la superficie adyacente a un curso fluvial susceptible a desbordes durante las épocas de avenida. Cuando las corrientes de agua rebasan sus cauces invaden las tierras bajas, pierden velocidad y como consecuencia depositan su carga formando terrazas de manera irregular. Así mismo, la dinámica de las quebradas (tributarios) da origen a depósitos aluvionales a manera de colinas de poca altura. Esta llanura aluvial está formada por material detrítico transportado y depositado de manera transitoria o permanentemente por una corriente de agua, compuesta por arena, grava, arcilla o limo (Figura 22).



Figura 22: Ciudad de Chimbote asentada sobre una llanura aluvial a poco metros del río Lacramarca.

.- **Colinas:** Son elevaciones del terreno, con pendiente suave, que por lo general no sobrepasan los 100 m. de altura. En Chimbote, las colinas tienen una altura máxima de 80 metros, se encuentran entre 50 a 200 metros cerca del cauce del río Lacramarca, poseen un relieve ondulado y su pendiente es menor a 30° . Estas colinas están cubiertas por arenas eólicas y otras con vegetación en su superficie (Figuras 23 y 24). El agente erosivo que afecta y modela su relieve es el viento (erosión eólica). Representan el 10% del área total de la ciudad de Chimbote.

.- **Pantanos:** Son cuerpos de agua estancada y compuestos de turbas y materiales orgánicos de alta plasticidad. Estos pantanos se encuentran ubicados al SE de la ciudad de Chimbote, en la margen izquierda del río Lacramarca. Los pantanos son

parte de la llanura aluvial y son abastecidos por el flujo de agua del río que se sumerge en el subsuelo (Figura 25 y 26).

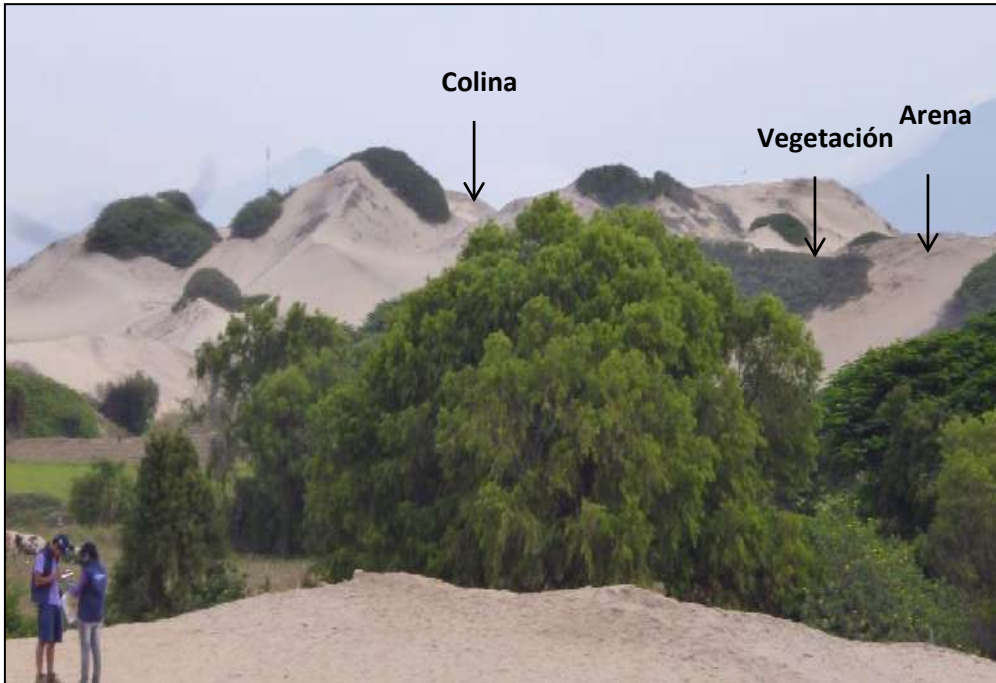


Figura 23: Ciudad de Chimbote y colinas cubiertas por arenas eólicas y presencia de humedad que permite el desarrollo de vegetación.

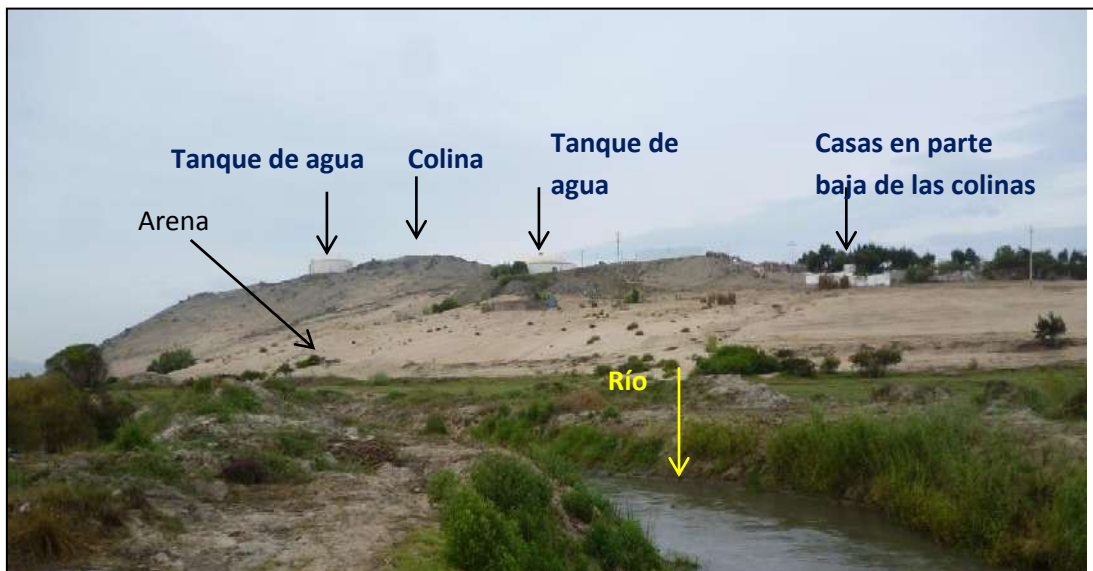


Figura 24: Ciudad de Chimbote y colinas con afloramientos de rocas intrusivas cubiertas por arenas eólicas. El río Lacramarca se encuentra a una distancia de 50 metros. Obsérvese la presencia de viviendas.



Figura 25: Zonas de pantanos cubiertos de vegetación. Parte del mismo es rellenado con material antrópico para posterior habilitación urbana.

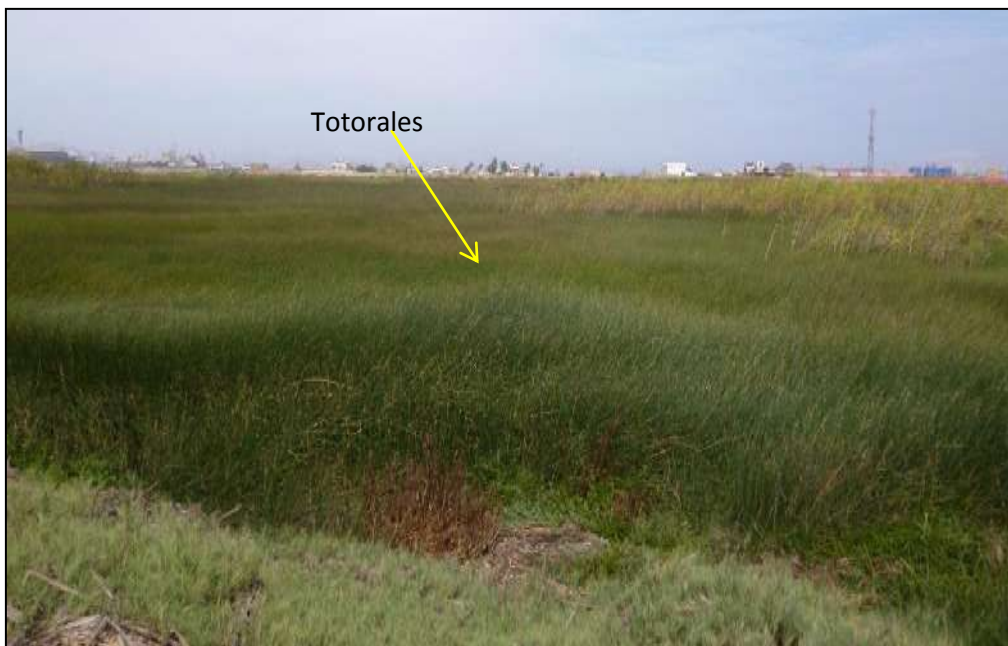


Figura 26: Zona de humedales con presencia de totorales en la margen izquierda del río Lacramarca.

.- **Dunas:** Son acumulaciones de arenas formadas por la dinámica del viento. También son llamadas arenas eólicas por formarse en el litoral costero. Estas geoformas son acumulaciones de arenas finas que se presentan, desde la costa sur de la bahía de Chimbote hasta la costa norte de la bahía de Samanco. Las dunas han sido transportadas por acción del viento predominante que llega desde el Océano Pacífico con una dirección NNE, acumulándolos hacia el interior de la bahía. En el

distrito de Nuevo Chimbote se encuentran en su extremo norte ocupando gran parte del terreno donde se encuentra el aeropuerto. En general, presentan alturas máximas de 2.30 metros y mínima de 1.20 metros con longitudes de 5 a 18 metros. Su estructura es de tipo barján o media luna (Figura 27 y 28). Estas pueden invadir terrenos de cultivo, carreteras y áreas pobladas.



Figura 27: Duna de arenas eólicas tipo barján con altura de 2 metros y longitud de 18 metros. .



Figura 28: Las arenas eólicas varían rápidamente su geoforma y logran invadir zonas pobladas como es el caso de los muros del aeropuerto.

.- **Estribaciones:** Son cadenas de montañas con alturas del orden de 600 m.s.n.m. constituidas por rocas del volcánico Casma (derrames andesíticos y riolíticos), e intrusivos (granodiorita) cubiertos por depósitos del cuaternario (arenas eólicas). Se encuentran en los extremos NE y NO de la ciudad de Chimbote, sobre un 10% del total de su territorio (Figuras 29 y 30).



Figura 29: Cerro La Juventud conformado por derrames andesíticos, ubicado al NO de Chimbote.



Figura 30: Vista lateral del cerro La Juventud. Se observa acumulación de arenas eólicas antiguas y canteras de material gravoso.

.- **Playa:** Son acumulaciones de arena, grava o mezcla de ambas, situadas en el borde costero con ancho variable y en cuya dinámica interviene fundamentalmente el oleaje. El transporte de los sedimentos hacia la zona de playa pueden ser de origen: fluvial, erosión de los acantilados, sedimentos del fondo marino y/o eólico, a los que se adiciona los resultantes por actividades antrópicas.

Las playas en Chimbote se han desarrollado a lo largo de una bahía que comprende aproximadamente 20 a 100 metros de ancho y 3 a 6 metros de altura (Figura 31), Está compuesta por capas de arena de granos gruesos y laminados con fragmentos de conchas marinas, en algunos sectores se encuentran las arenas mezcladas con arcillas. Esta unidad representa el 10% del área total de Chimbote.



Figura 31: Playa en Chimbote, frente a la Urbanización La Caleta, tiene 24 metros de ribera y 3 metros de altitud. Está conformada por arenas de grano grueso.

En gran parte de la bahía de Chimbote se ha construido defensas ribereñas para proteger el área de la erosión marina (Figura 32), el enrocado tiene 2 metros de altura y un ancho de 1.50 metros en promedio.

9.2.- Geología

Como información de base se consideró el Cuadrángulo Geológico de Chimbote editado por INGEMMET a escala 1/100,000 (Hoja: 17-f). Según la columna litoestratigráfica de Chimbote (Tabla 2), los suelos están compuestos por derrames andesíticos de la Formación La Zorra y rocas intrusivas (gabro-dioritas y tonalitas),



Figura 32: En las playas se ha construido muros de rocas como medida ante la erosión marina.

ambas unidades pertenecientes al Cretáceo Inferior, que afloran en los extremos Norte y Sur del área de estudio. Suprayacen a estas rocas, depósitos del Cuaternario con diferentes orígenes, entre ellos: los depósitos aluviales (Qr-al) conformados por materiales sueltos y poco consolidados (zona urbana). Por encima de esta unidad se ha cartografiado la presencia de depósitos coluviales (Qr-co), ubicados en las laderas del Cerro Chimbote ubicado al NE del área, todos formados por la meteorización de las rocas pre-existentes.

Tabla 2: Columna estratigráfica de Chimbote y Nuevo Chimbote

CRONOESTRATIGRAFIA			LITOESTRATIGRAFIA			
ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDAD ESTRATIGRAFICA	LITOLOGIA	ROCAS INTRUSIVAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	RECIENTE	Depósito Antrópico	Qr-a		
			Depósitos Eólicos	Qr-e		
			Depósitos Marinos	Qr-m		
			Depósitos Eluviales	Qr-el		
		Depósitos Coluviales	Qr-co			
		Depósitos Aluviales	Qr-al			
MESOZOICO	CRETACEO	INFERIOR	Fomación La Zorra	xx	Santa Rosa	Tonalitas
				xx	Patap	Gabro-Dioritas
				xx		

Igualmente, se encuentran aflorando depósitos eluviales (Qr-el) conformados por arenas y limos, y sobre estos, las labores agrícolas. En el borde costero de Chimbote se reconocen depósitos marinos (Qr-m) conformados por arenas semiconsolidadas y depósitos eólicos (Qr-e) distribuidos en los alrededores de la ciudad, estos últimos compuestos por arenas de grano fino y conformando dunas; aunque en algunos lugares los depósitos eólicos cubren afloramientos ígneos. Finalmente, se tiene la presencia de depósitos antrópicos (Qr-a) ubicados en el cerro Coishco y compuestos por rellenos sanitarios y desmontes (Figura 33).

9.2.1.- Rocas Intrusivas

Esta unidad agrupa a otras conformadas por rocas plutónicas de tipo gabros y dioritas, originadas por diferentes pulsos magmáticos que se caracterizan por poseer propiedades químicas similares y formados en diferentes edades, siendo las más importantes las siguientes (Figura 34):

.- **Super Unidad Patap:** Constituida por cuerpos de gabros y dioritas del Cretácico Inferior, afloran al NE del Vivero Forestal, en los Cerros Coishco y Huamanchacata, y en la Isla Blanca. La textura de los intrusivos varía de grano medio a grueso, moderadamente oxidados y muy fracturados, por esta razón toman un color oscuro.

.- **Super Unidad Santa Rosa:** Las rocas de esta unidad son de tipo tonalitas-dioritas. Las muestras en mano tienen un color gris oscuro, de grano medio a grueso. Las tonalitas afloran en menor porcentaje en las inmediaciones de la Campiña de Chimbote, también parte del cerro Península (Puerto Chimbote) y en menor proporción, al Este de la ciudad de Chimbote, fundo San Antonio.

9.2.2.- Rocas Volcánicas

Formación La Zorra: Esta unidad litológica aflora en el cerro "La Juventud" ubicado al Norte de Chimbote (Mirador de Chimbote), La Península y cerro División, estos dos últimos se encuentran al Sur Oeste de Chimbote, y en playa Caleta Colorada. Está compuesto principalmente por flujos piroclásticos andesíticos, en capas delgadas, bien estratificadas. En algunas zonas, estos afloramientos pueden presentar, en su estructura, pequeños pliegues. Las rocas se encuentran meteorizadas, ligeramente oxidadas, rugosa y moderadamente fracturadas (Figuras 35 y 36).



Figura 34: Afloramiento de rocas tonalitas cubiertas por arenas eólicas. La unidad se encuentra a la izquierda del río Lacramarca.

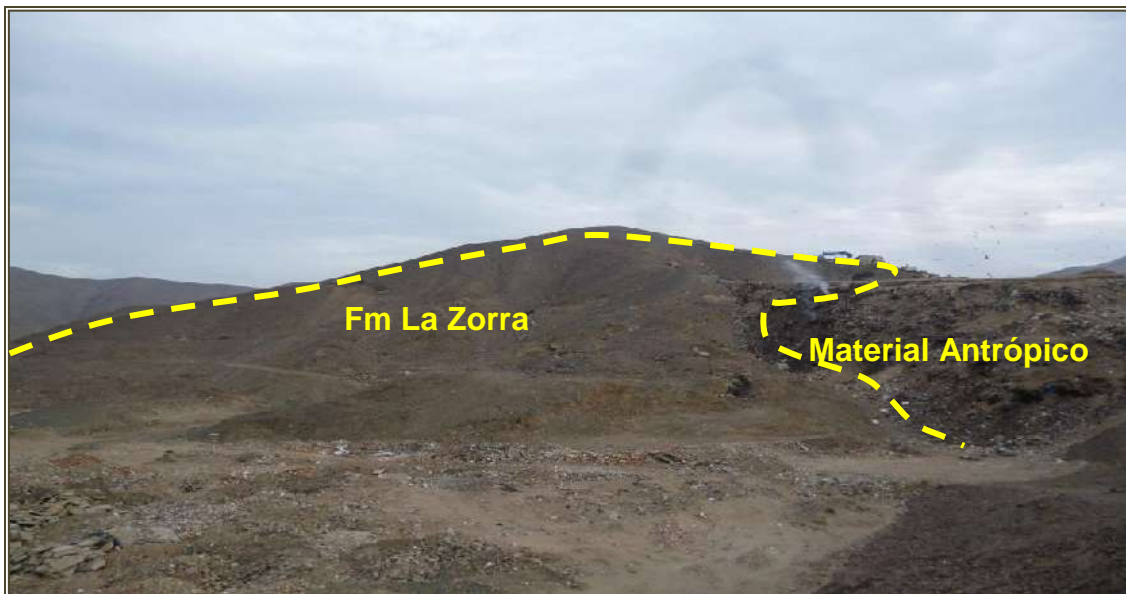


Figura 35: Afloramiento de la formación La Zorra que infrayace a materiales antrópicos ubicados al noroeste de la ciudad de Chimbote

9.2.2.- Depósitos Cuaternarios

Depósitos Antrópicos: Son materiales no consolidados, de mala selección y generados por la actividad humana. Se encuentran modificando fuertemente el relieve

en la zona norte de Chimbote (a pocos metros de la zona denominada la mano de Coishco) y están compuestos principalmente de materiales de escombros de construcción y relleno sanitario (Figura 37).



Figura 36: Cerro Huamanchaca y presencia de derrames andesíticos de la formación La Zorra.

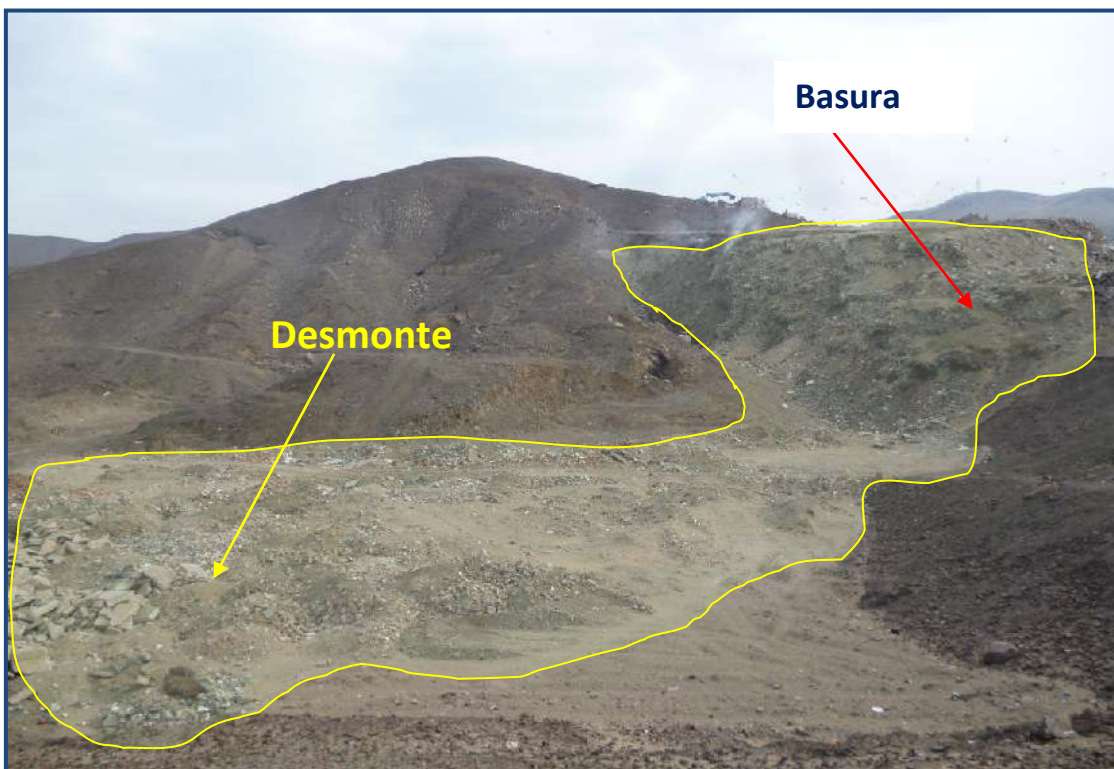


Figura 37: Relleno sanitario acumulado sobre el cerro Huamanchaca.

.- **Depósitos eólicos:** Están constituidos por arenas de grano fino bien redondeados. En la actualidad se encuentran cubriendo lomadas, depresiones, superficies planas y las laderas de los cerros. En algunas zonas estos depósitos se encuentran formando mantos, dunas, alcanzando espesores mayores en las depresiones o desniveles topográficos (Figura 38 y 39).



Figura 38: Depósitos eólicos formando pequeñas dunas en el extremo SE de la ciudad de Chimbote.



Figura 39: Depósitos eólicos cubriendo las laderas de los cerros cerca del AAHH Las Lomas de Sider.

.- **Depósitos Marinos:** Son acumulaciones de arenas semiconsolidadas, ubicados a lo largo del litoral de la ciudad de Chimbote. Tienen tonalidades que van desde gris a claro y presentan granos redondeados que se movilizan por acción de las olas (Figura 40).



Figura 40: Depósitos marinos ocupando gran parte de la zona costera de Chimbote y Nuevo Chimbote. Presentan variedad de granos en cuanto a tamaño y tonalidades.

.- **Depósitos Eluviales:** Son acumulaciones de suelos de grano fino, arcillas, limos y arenas que se encuentran ocupando la mayor parte de la ciudad de Chimbote. En esta unidad se han desarrollado actividades agrícolas (Figura 41).



Figura 41: Depósitos aluviales en zonas de cultivo. Extremo Este de la ciudad de Chimbote. Zona de posible crecimiento de la ciudad.

.- **Depósitos Coluviales:** Corresponden a depósitos no consolidados de gravas angulosas con matriz de arenas y limos en porcentajes variables como resultado del lavado y desprendimiento de las rocas y su posterior acumulación en las depresiones y bases de laderas, por ejemplo el cerro Chimbote. Se encuentran en el extremo Noreste de la ciudad de Chimbote, Figura 42.



Figura 42: Depósitos de clastos angulosos y mal gradados ubicados en la Panamericana Norte, rumbo a Coishco.

.- **Depósitos Aluviales:** Son materiales sueltos o poco consolidados de naturaleza fina que han sido transportados cierta distancia hasta el lugar de acumulación actual. Sobre esta unidad se encuentra el casco urbano de la ciudad de Chimbote, Figura 43.



Figura 43: La zona urbana de Chimbote se encuentra asentada sobre depósitos aluviales.

9.3.- Geodinámica

La geodinámica aborda todos los procesos denudativos que modelan el relieve de la superficie terrestre e incluye aquellos movimientos que se producen, ladera abajo, de una masa rocosa, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991), ver Figura 44. Estos procesos modifican la morfología de manera que podrían afectar la seguridad física de las poblaciones.

9.3.1.- Movimientos en Masa

En la ciudad de Chimbote, como movimientos en masa se tiene a los procesos de caída de rocas, zonas saturadas con probabilidad de licuación de suelos y procesos erosivos (ver Anexo 1).

.- **Caída de rocas:** En Chimbote, este tipo de procesos se encuentra en el trayecto de ascenso al cerro La Juventud. Las rocas de origen ígneo que conforman el cerro, muestran fracturamientos intensos, lo cual facilita el desprendimiento de bloques ladera abajo afectando la seguridad física de la población asentada en los alrededores (Figura 45).

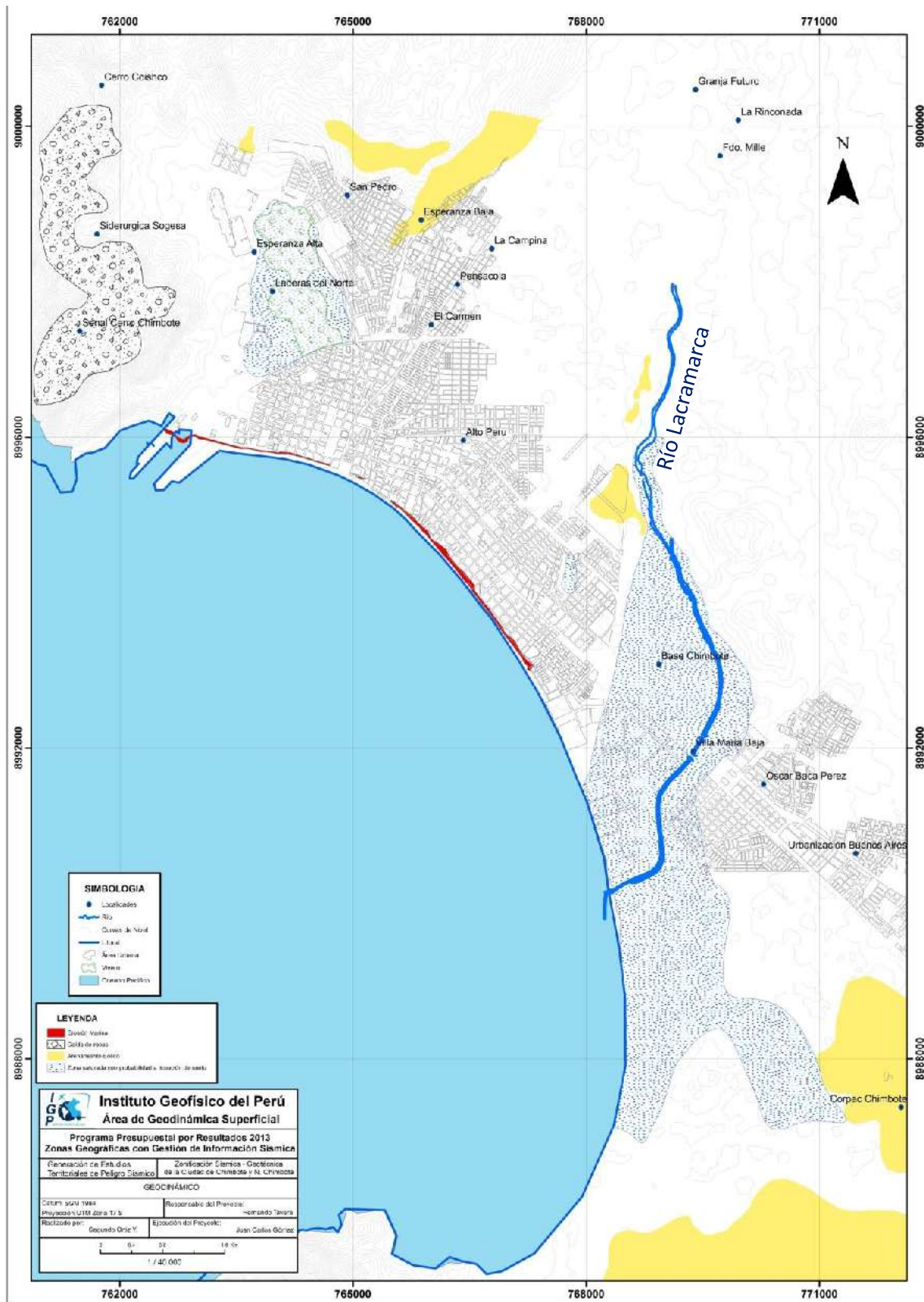


Figura 44: Mapa geodinámico para la ciudad de Chimbote



Figura 45: Caída de rocas de origen ígneo en el ascenso al cerro La Juventud

.- Zonas saturadas con probabilidad a licuación de suelos: En la ciudad de Chimbote, las áreas con potencial de licuación de suelos están constituidas por materiales como limos y arenas finas en estado saturado. Esas se encuentran cercanas al cauce del río Lacramarca, por ejemplo Villa María (Figura 46). Similar escenario se presente en el área del Vivero Forestal (Figura 47). Ambas áreas son susceptibles a procesos de licuación de suelos.



Figura 46: Pantanos de Villa María ubicados en el extremo sur de la ciudad de Chimbote. Obsérvese el terreno completamente saturado de agua.



Figura 47: Vivero Forestal de Chimbote con suelos saturados de agua y presencia de limos y arenas.

Debido al sismo del 31 de Mayo de 1970, en varios sectores de la ciudad de Chimbote se produjeron asentamientos de terreno, agrietamientos de edificaciones y formación de volcanes de arena. Por ejemplo, en los alrededores del Hotel Chimú se observó la formación de una depresión superficial de medianas dimensiones producto del asentamiento de depósitos marinos debido al reordenamiento de materiales subyacentes afectados por licuación de suelos (Figura 48). Posterior al evento sísmico, los suelos afectados fueron rellenados y luego compactados, a tal punto que en la actualidad no se observa evidencias de inestabilidad de suelos (Figura 49).



Figura 48: Inmediaciones del Hotel Chimú y suelos con asentamientos diferenciales debido a proceso de licuación de suelos a causa del sismo de 1970.



Figura 49: Frontis del Hotel Chimú, año 2013. Observese suelos sin asentamientos del terreno.

9.3.2.- Procesos Erosivos

La erosión, involucra varios procesos naturales que alteran la composición química y estructura física de las rocas que afloran sobre la superficie terrestre, ocasionando el desgaste y destrucción de las mismas. La erosión es el resultado de la acción combinada de factores como: temperatura, agua, viento, entre otros. Es la responsable de los diferentes relieves que adopta la corteza terrestre. En la ciudad de Chimbote, predominan la erosión marina y arenamiento eólico por su proximidad al litoral.

.- **Erosión marina:** Proceso ocasionado por la dinámica de las olas sobre los materiales que conforman el litoral. La parte central de la zona costera es la más afectada, llegándose a proyectar el desarrollo de obras de protección como enrocados. Sin embargo, es necesario extender estas medidas estructurales hacia la zona Sur para atenuar la erosión y evitar posibles inundaciones en las zonas costeras, por ejemplo en A.H. Miramar Bajo, Figura 50.

.- **Arenamiento eólico:** Son depósitos de arenas finas presentes al Este y Sur de la ciudad de Chimbote en forma de dunas alargadas y dispuestas sobre el terreno en dirección SO-NE, por ejemplo, el cerro Tres Cabezas (Figura 51) y zonas aledañas al aeropuerto Jaime Montreuil Morales. Del mismo modo, los depósitos están presentes en los AAHH Primavera Alta, Octavio de Arroyo y San Pedro.



Figura 50: Erosión marina frente al AAHH Miramar Bajo. Los escombros se encuentran formando barreras, situación que no corresponde a una solución técnica al problema.



Figura 51: Viviendas ubicadas cerca del cerro Tres Cabezas. Obsérvese como los depósitos eólicos han sobrepasado la altura de las casas.

9.3.3.- Inundación Fluvial

El río Lacramarca se encuentra dentro de la cuenca del mismo nombre y en menor porcentaje, como parte de la Intercuenca Buenos Aires hacia el Oeste de la ciudad (Figura 52). Nace en la confluencia de las quebradas Pampa del Toro y Tantarán (cota de 1048 m.s.n.m.), pasando por los poblados de Santa Clemencia y San José hasta llegar al área denominada Tres Cabezas, para luego desembocar en el Océano Pacífico por el extremo sur de la ciudad.

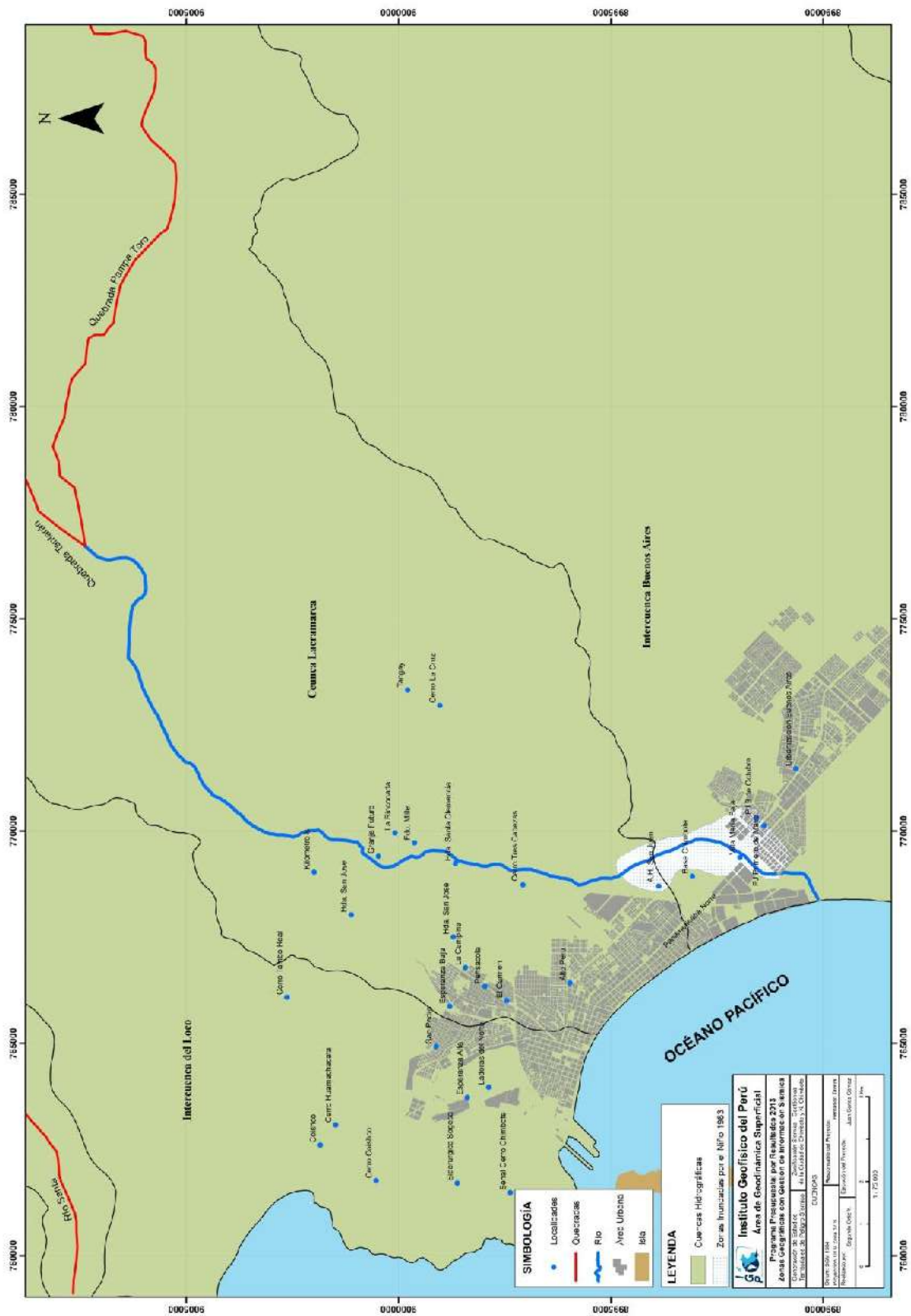


Figura 52: Distribución de cuencas e intercuencas en la ciudad de Chimbote. La cuenca mayor es la que corresponde al río Lacramarca.

El río Lacramarca tiene un recorrido aproximado de 23 Km sobre una pendiente de 6°, presentando sinuosidad en gran parte de su trayectoria, ver Figura 53. En su recorrido, el río forma algunas lagunas cuyas aguas se usan predominantemente para las actividades agrícolas mediante técnicas de canales.



Figura 53: Río Lacramarca con sus cauces colmatados con sedimentos de arenas de grano fino a medio.

.- Zonas susceptibles a inundaciones: Las inundaciones se producen debido a la saturación de agua en un cauce principal, registrado en un determinado lugar y en épocas de lluvias intensas y prolongadas, lo cual genera que el nivel de los ríos supere su límite y se desborde. Otra causa es la acumulación de sedimentos a lo largo del cauce provocando que el río tenga poca profundidad, lo cual facilita el aumento de su caudal y posterior rebase a zonas aledañas. Contribuyen a este proceso, la acumulación de basura y desmontes por parte de las actividades humanas.

El río Lacramarca sirve como límite entre los distritos de Chimbote y Nuevo Chimbote, y en general, se ha identificado hasta tres posibles causas para presentarse escenarios de inundación perjudicando básicamente a las poblaciones aledañas y áreas agrícolas.

.- Caudales Hídricos: Para Chimbote, la única información sobre caudales hídricos del río Lacramarca es la proporcionada por CESEL Ingenieros (2011) para el año 2010 y corresponden a los caudales mensuales de las estaciones de San Jacinto (río

Nepeña) y Condorcero (río Santa). De acuerdo a la Figura 54, los máximos caudales se presentaron para el trimestre febrero-abril con valores de $0.50 \text{ m}^3/\text{seg}$.

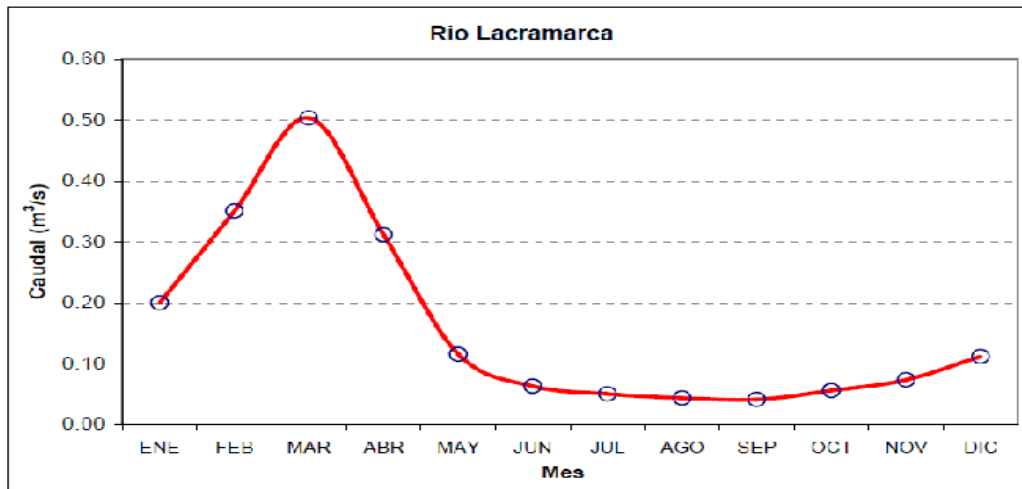


Figura 54: Caudales medios mensuales para el río Lacramarca, año 2010.

.- Eventos extremos en río Lacramarca: Los principales eventos extremos asociados a inundaciones en el río Lacramarca fueron debidos a la presencia del fenómeno El Niño (Agro Acción Alemana, 2010) y ellos presentaron las siguientes características:

En Marzo de 1972, fenómeno El Niño considerado como moderado, pero causó estragos graves en la zona costera del departamento de Ancash, que recién se recuperaba de la destrucción sufrida por el terremoto de mayo de 1970. El desborde del río Lacramarca inundó el casco urbano de la ciudad, incluida la plaza de armas y avenidas principales. Los sistemas de saneamiento fueron seriamente dañados, además de la colmatación y oclusión de las redes de agua y desagüe. Asimismo, doscientas hectáreas de cultivos fueron inundadas con la pérdida de los sembríos. Los daños registrados durante la inundación consideran a tres mil familias y viviendas afectadas. Se estimó una pérdida de aproximadamente s/. 200 millones en daños materiales.

Año 1983, fenómeno El Niño afectó intensamente a la ciudad de Chimbote al producirse una intensa e inusual lluvia que desbordo nuevamente el río Lacramarca. Resultaron afectados los asentamientos humanos de San Juan, Villa María, 3 de Octubre y 1 de Mayo, todos ubicados en zonas pantanosas entre el cerro Tres Cabezas, Av. Pardo y Panamericana Norte al altura del estadio La Pensacola. También causaron serios daños en las instalaciones de la empresa siderúrgica

SIDERPERÚ, que se vio obligada a paralizar temporalmente sus actividades. Se produjo la destrucción de un canal que irrumpió el riego de 6000 mil hectáreas de cultivo. Finalmente, se produjo el corte del servicio de agua potable a la población del cono sur de la ciudad de Chimbote.

En Febrero y Marzo de 1998, fenómeno El Niño que produjo intensas lluvias en la ciudad de Chimbote llegando a generar el desborde del río Lacramarca para inundar el AAHH Villa María (extremo Norte del distrito de Nuevo Chimbote), dejando medio centenar de viviendas afectadas.

.- Modelamiento para evaluar el peligro de inundación

Para determinar las zonas susceptibles a inundación a lo largo del cauce del río Lacramarca, se han realizado diez (10) secciones topográficas equidistantes en un kilómetro en promedio, llegando a cubrir una longitud de 8.20 km del cauce. Las coordenadas UTM, de las secciones topográficas construidas sobre el caudal del río Lacramarca son (Tabla 3 y Figura 55). Asimismo, para conocer la velocidad del agua en el cauce del río, se realizaron medidas in situ del caudal de agua con un correntómetro manual marca Global Water FP211-GW, siendo los resultados caudales mínimos de 5.35 m³/seg.

Tabla 3: Coordenadas UTM para la ubicación de las secciones topográficas. Las correspondientes a las secciones 04 y 08 no fueron tomadas en cuenta.

PUNTOS	NORTE (m)	ESTE(m)	ELEVACION (m)
Sección "01"	8990506	768908	7
Sección "02"	8991146	768895	11
Sección "03"	8991688	769125	16
Sección "05"	8992328	769578	18
Sección "06"	8993113	769664	19
Sección "07"	8993823	769376	18
Sección "09"	8995458	768715	24
Sección "10"	8996308	768843	25
Sección "11"	8997138	769083	27
Sección "12"	8997272	769063	27



Figura 55: Distribución espacial de las diez secciones topográficas elaboradas sobre el río Lacramarca.

Para realizar la simulación numérica para las 10 secciones sobre el río Lacramarca, se utilizó el software HEC-RAS y datos como el levantamiento topográfico, los caudales máximos y mínimos, el espesor de agua, entre otros. Los resultados se obtuvieron para caudales de 5.35 y 20 m³/seg (Figuras 56 y 57).

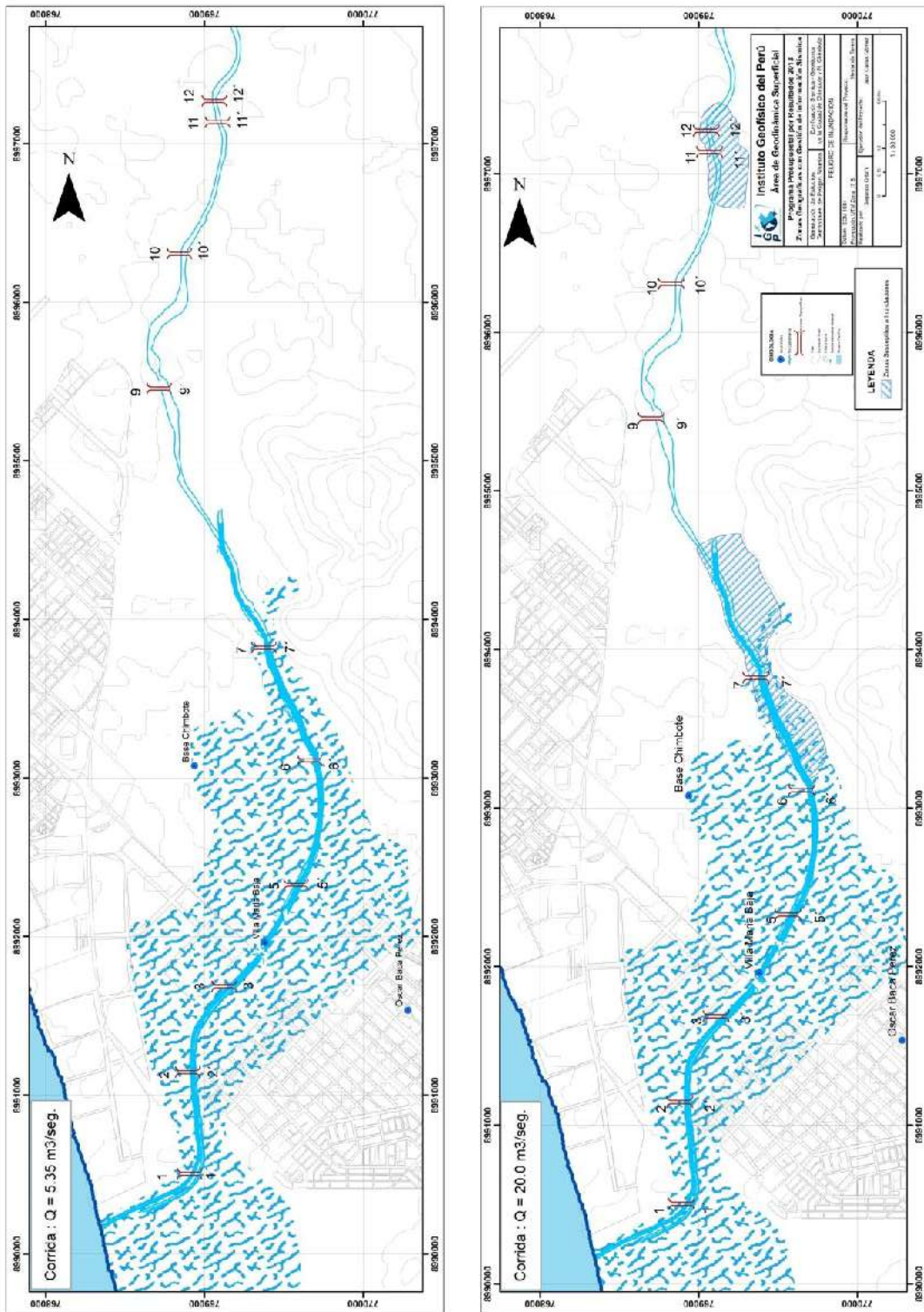


Figura 56: Simulación numérica de inundación para el río Lacramarca.

Los resultados obtenidos muestran que sólo con un caudal máximo de 20 m³/seg, se presentan escenarios críticos de inundación en las áreas correspondientes a las secciones 07, 11 y 12, en todos los casos es debido al desnivel que existe entre ambas márgenes del río (ver Anexo 2).

.- **Sección_07:** Se encuentra ubicada, en dirección SO, a 200 metros del reservorio de Chimbote. Según datos de campo, presenta un ancho promedio 28 m y profundidad de agua de 0.64 m. Los datos topográficos evidencian que la margen izquierda del río presenta un desnivel mayor al margen derecho; por lo tanto, es susceptible a inundaciones (Figura 57). Esta zona se caracteriza por presentar terrenos agrícolas (Figura 58).

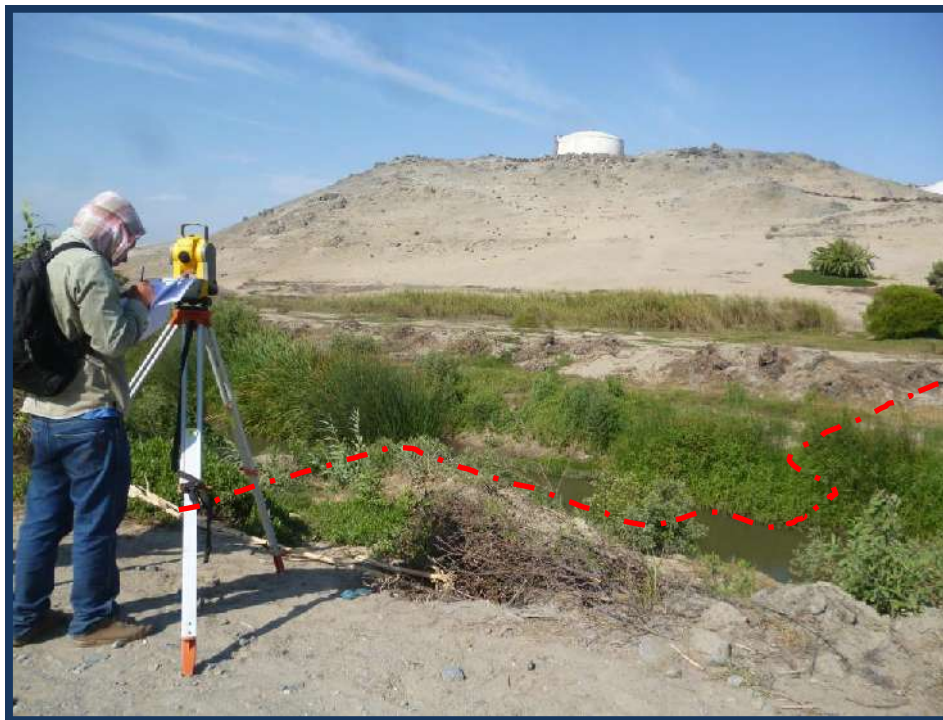


Figura 57: La margen izquierda del río Lacramarca se encuentra a desnivel con respecto al margen derecho, por lo tanto, propicio para escenarios de inundación.

.- **Sección_11:** Se encuentra ubicada, en dirección NE, a 600 m del cerro Tres Cabezas. Según datos de campo presenta un ancho promedio de 15 m y una profundidad de agua de 1.5 m. Se evidencia que la margen izquierda del río presenta un desnivel mayor al margen derecho; por lo tanto, es susceptible a inundaciones (Figura 57).



Figura 58: Extremo SO de la ciudad de Chimbote. Los terrenos agrícolas se encuentran a pocos metros del río Lacramarca.

.- **Sección_12:** Se encuentra ubicada, en dirección NE, a 750 m del cerro Tres Cabezas. Según datos de campo presenta un ancho promedio 13 m y una profundidad de agua de 0.98 m. Se evidencia que la margen izquierda del río presenta un desnivel mayor con respecto al margen derecho; por lo tanto, es susceptible a inundación.

10.- GEOTECNIA

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 Chimbote se construyeron 14 calicatas (Tabla 4 y Figura 59), siendo la profundidad máxima de observación de 3 metros y la mínima de 1.3 metros. A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 9 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Figura 59), siendo en este caso, la máxima profundidad de observación de 2.5 metros y la mínima de 1.3 metros. Para ambos casos, el análisis en laboratorio permitió clasificar a los suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El total de la información geotécnica se presenta en el Anexo 3.

Tabla 4: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas

CALICATA	PROF. (m)	COORDENA DA ESTE (m)	COORDENA DA NORTE (m)	NIVEL FREATICO (m)
CH_01	1.95	763508	8999679	NO PRESENTA
CH_02	2.2	765274	8998755	NO PRESENTA
CH_03	1.3	764511	8996688	1.10 m
CH_04	2.6	766383	8998456	NO PRESENTA
CH_05	3	765621	8997726	NO PRESENTA
CH_06	2.4	766142	8996591	2.35 m
CH_07	2.5	765949	8995547	NO PRESENTA
CH_08	2	766158	8994757	2.00 m
CH_09	1.4	767263	8995870	1.45 m
CH_10	1.4	767075	8994414	1.40 m
CH_11	2.25	768078	8994754	NO PRESENTA
CH_12	2	767418	8993334	2.00 m
CH_13	1.5	769026	8992946	1.50 m
CH_14	1.35	768434	8991098	1.35 m

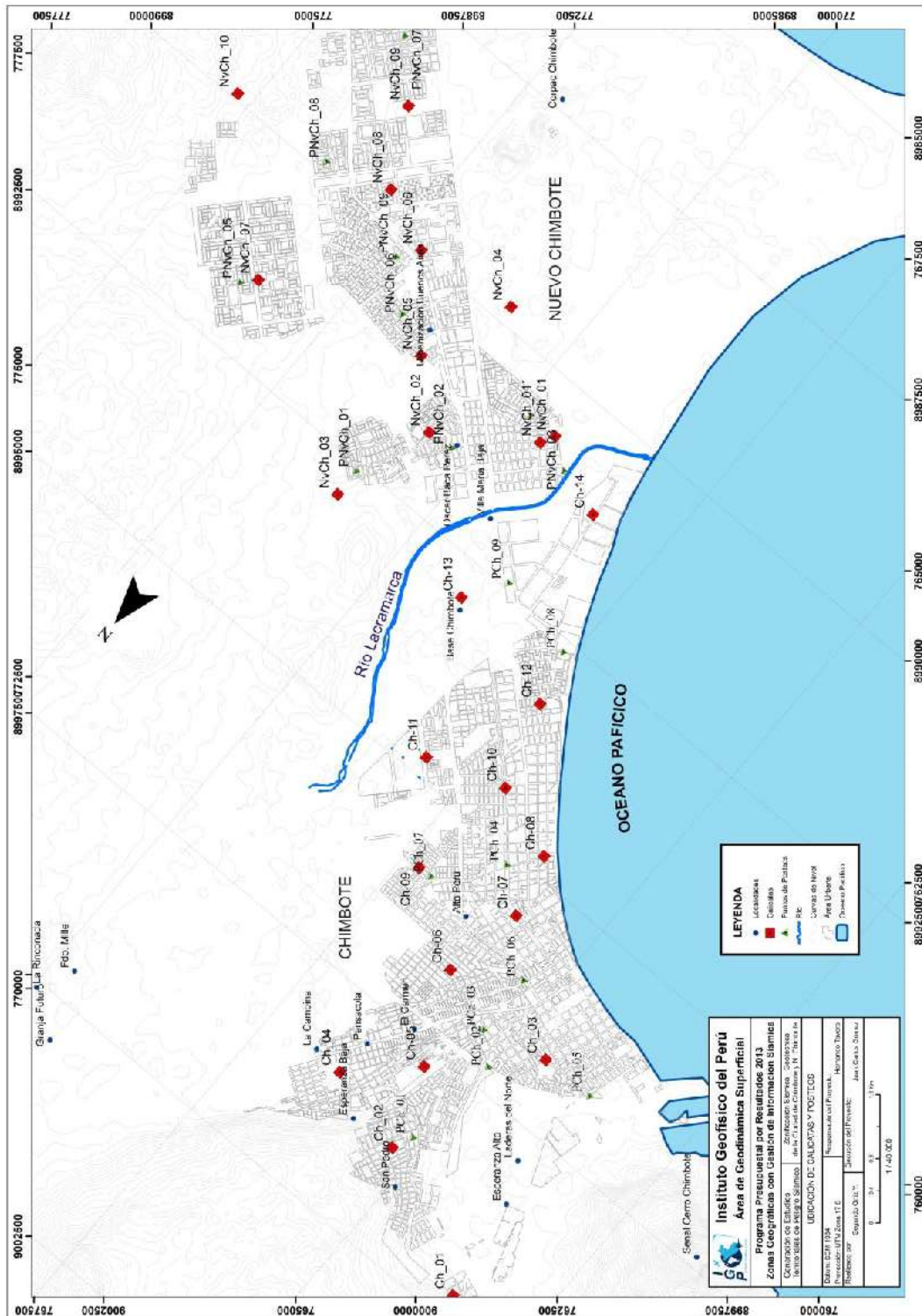


Figura 59: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Chimbote

10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos y la publicada por INADUR (2000), se realiza la clasificación de suelos SUCS para la ciudad de Chimbote. Se ha identificado la existencia de 3 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Tabla 5, Figura 60):

***.- Suelos tipo SP:** La ciudad de Chimbote se encuentra asentado sobre arenas pobremente gradadas, arenas y gravas con pocos finos, y de color que va de beige a marrón. El contenido de humedad varía desde 0.39% en el extremo norte de la ciudad de Chimbote a 22.91% en el extremo sur cerca a los pantanos, por ello el alto porcentaje de humedad. No presenta plasticidad, ni límite líquido.*

***.- Suelos tipo SM:** Lo conforman arenas limosas, mezcla de arenas y limos mal gradados de color marrón. En el extremo Noreste de la ciudad de Chimbote se ubica el AH. La Campiña y Esperanza baja, con contenido de humedad de 9.94%. En la zona centro se encuentran los AH Pueblo Libre y Mirador Alto, con contenido de humedad de 20.37% (calicata 07) debido a que la napa freática es superficial. En el extremo sur, en el área denominada la base Chimbote, los suelos presentan un contenido de humedad de 19.72%, esto es alto por encontrarse a pocos metros de la zona pantanosa. No presenta límite plástico ni límite líquido.*

***.- Suelos tipo SP-SM:** Lo conforman arenas pobremente gradadas con arenas limosas. Se encuentran en el extremo Este de la ciudad de Chimbote, abarca Av. Precursores, AH Alto Perú y parte del AH 10 de Setiembre. El contenido de humedad es de 19.20% y no presenta plasticidad ni límite líquido.*

Tabla 5: Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Chimbote

Calicata	Profundidad (m)	Uniformidad	Curvatura	Límite Plástico (%)	Límite Líquido (%)	Contenido de Humedad (%)	Grava(> 4.76 mm)	Arena (>0.74mm<4.76mm)	Finos (<0.074)	SUCS	DENOMINACIÓN
Ch_01	1.95	1.36	0.96	NT	NP	0.39	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada
Ch_02	2.20	1.48	0.96	NT	NP	0.65	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada
Ch_03	1.30	1.58	0.97	NT	NP	20.96	0	96	4	SP	Arena pobr. gradada
Ch_04	2.60	—	—	NT	NP	9.94	6	74	20	SM	Arena limosa
Ch_05	3.00	1.46	0.96	NT	NP	0.48	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada
Ch_06	2.40	1.51	0.96	NT	NP	19.87	0	98	2	SP	Arena pobr. gradada
Ch_07	2.50	—	—	NT	NP	20.37	0	63	37	SM	Arena limosa
Ch_08	2.00	1.84	0.89	NT	NP	2.06	0	98	2	SP	Arena pobr. gradada
Ch_09	1.40	3.54	1.96	NT	NP	19.20	0	89	11	SP-SM	Aren pobr. grad-Aren.lim
Ch_10	1.40	1.48	0.96	NT	NP	21.69	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada
Ch_11	2.25	1.5	0.96	NT	NP	2.95	0	98	2	SP	Arena pobr. gradada
Ch_12	2.00	1.42	0.96	NT	NP	10.60	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada
Ch_13	1.50	—	—	NT	NP	19.72	0	82	18	SM	Arena limosa
Ch_14	1.35	1.44	0.96	NT	NP	22.91	0	99	1	SP	Arena pobr. gradada

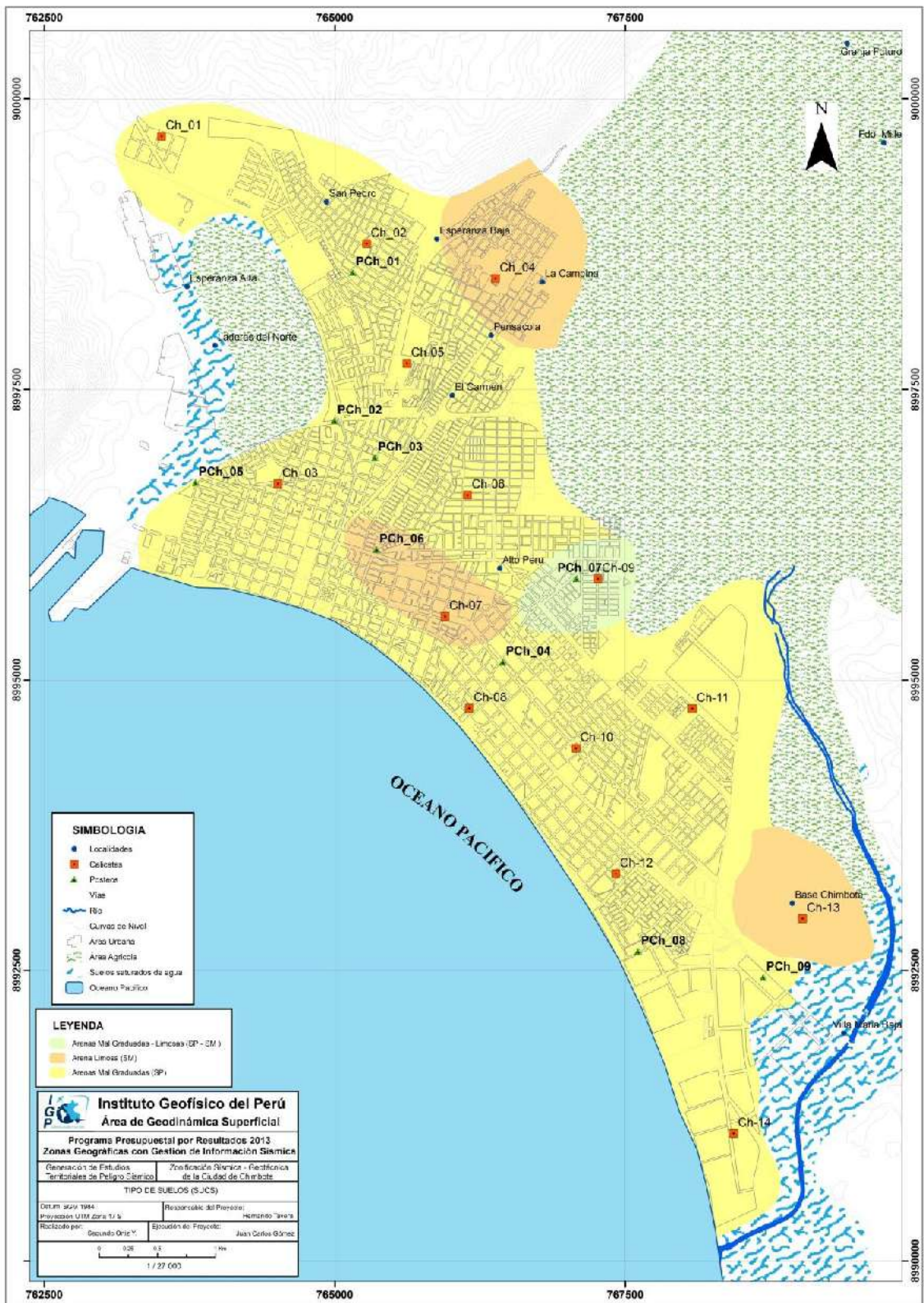


Figura 60: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Chimbote

10.2.- Capacidad Portante

La capacidad del terreno para soportar cargas aplicadas sobre él es denominada como capacidad portante. Este parámetro ha sido determinado para los suelos de la ciudad de Chimbote a partir de ensayos de corte directo al material muestreado en 14 calicatas elaboradas en la ciudad. Los valores obtenidos en laboratorio corresponden a una profundidad y ancho mínimo de cimentación de 1.20 y 1.0 metros (Tabla 6). Los resultados obtenidos para la ciudad de Chimbote han permitido clasificar a los suelos en tres rangos que definen su capacidad portante en baja, media y alta, con las siguientes características (Figura 61):

Tabla 6: Valores de capacidad portante para las calicatas elaboradas en la ciudad de Chimbote

CALICATA S	Angulo de Fricción interna del Suelo (°)	Cohesión Aparente del Suelo (Tn/m ²)	Densidad seca Promedio (gr/cm ³) (< N° 4)	Humedad Natural (%)	Capacidad Carga Admisible (Kg/cm ²)
Ch_01	27.55	0.1	1.6	0.39	1.36
Ch_02	26.56	0.3	1.8	0.65	1.35
Ch_03	29.8	0.1	1.4	20.96	1.58
Ch_04	28.6	0	1.4	9.94	1.35
Ch_05	30.9	0	1.7	0.48	2.21
Ch_06	32	0.5	1.65	19.87	2.47
Ch_07	29.7	0.3	1.55	20.37	1.8
Ch_08	29.05	0.1	1.65	2.06	1.69
Ch_09	30.9	0.3	1.65	19.2	2.21
Ch_10	29.05	0.1	1.6	21.69	1.63
Ch_11	26.56	0.3	1.6	2.95	1.2
Ch_12	26.56	0.3	1.65	10.6	1.24
Ch_13	29	0	1.7	19.72	1.73
Ch_14	28.05	0	1.6	22.91	1.44

.- Capacidad portante baja (1-2 kg/cm²): Considera a suelos medianamente compactos y recomendables para la cimentación de viviendas de hasta dos pisos. Estos suelos están presentes en toda la zona urbana de la ciudad de Chimbote. En el extremo norte considera a los AAHH San Pedro, Esperanza Baja, Esperanza Alta, La Unión, Cesar Vallejo, casco urbano y La campiña. Asimismo, los AAHH Miramar, Miramar bajo, Ciudad de Dios, Florida baja, Tres Estrellas, La Florida y P.J. Pueblo Libre, En el extremo sur, abarca a los AAHH Señor de los Milagros, La Libertad, San Juan y Villa España.

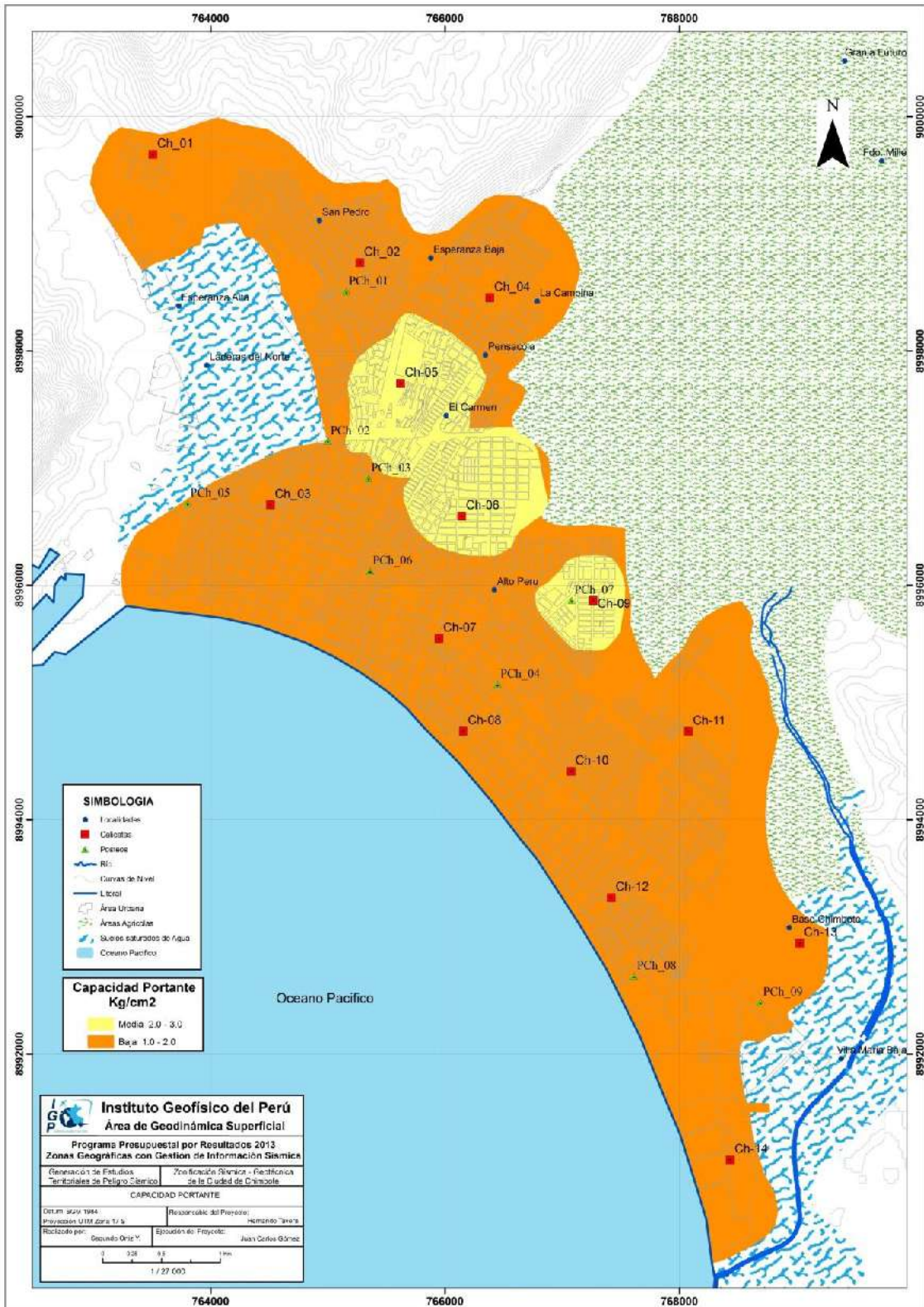


Figura 61: Mapa de capacidad portante para la ciudad de Chimbote

.- Capacidad portante media (2-3 kg/cm²): Considera a suelos moderadamente compactos y recomendables para la cimentación de viviendas de hasta tres pisos con condiciones técnicas específicas. Estos suelos están presentes en los AAHH 16 de Diciembre, San Isidro, 10 de Setiembre y Alto Perú, además de la Urb. El Carmen y el P.J. Dos de Mayo

.- Capacidad portante alta (>3 kg/cm²): Corresponde a suelos compactos y recomendables para la cimentación de viviendas con más de tres pisos. Estos suelos están presentes en Paseo del Mar a espaldas de la Urb. Los Domos.

10.3.- Nivel Freático Superficial

Otro de los objetivos primordiales del estudio geotécnico, es determinar el nivel freático superficial presente en la ciudad de Chimbote; es decir, conocer la ubicación, en el subsuelo, de la capa saturada, ya que la presencia de agua, en relación a los esfuerzos aplicados, produce una disminución de las propiedades y características de resistencia de los suelos. Para su determinación se ha tomado información de las calicatas y posteos elaborados en la ciudad de Chimbote y los resultados se presentan en la Figura 62 y Tabla 7. En la ciudad de Chimbote, la profundidad promedio del nivel freático es de 1.67 m. El nivel freático más profundo se encuentra a 2.35 m en el parque y AAHH Dos de Mayo; mientras que, el más superficial se encuentra a 1.10 m en el parque La Balanza, Urb. Enrique Palacios.

Tabla 7: Registro del nivel freático superficial para las ciudades de Chimbote (Ch_*, PostCh_*) y Nuevo Chimbote (Nch_*, PostNch_*)

Punto	Norte	Este	Cota	SUCS	Nivel Freático (m)
Ch_03	8996688	764511	15	SP	1.1
CH_06	8996591	766142	14	SP	2.35
Ch_08	8994757	766158	20	SP	2
Ch_09	8995870	767263	30	SP-SM	1.45
Ch_10	8994414	767075	26	SP	1.4
Ch_12	8993334	767418	15	SP	2
Ch_13	8992946	769026	22	SP	1.5
Ch_14	8991098	768434	17	SP	1.35
Nch_15	8990832	769514	17	SP	1.65
PostCh_04	8995154	766443	29	SP	2
PostCh_06	8996121	765356	15	SP	1.9
PostCh_07	8995871	767075	26	SP	1.6
PostCh_08	8992655	767609	28	SP	1.45
PostCh_09	8992440	768685	21	SP	1.65
PostNch_02	8991611	770318	22	SP	1.6

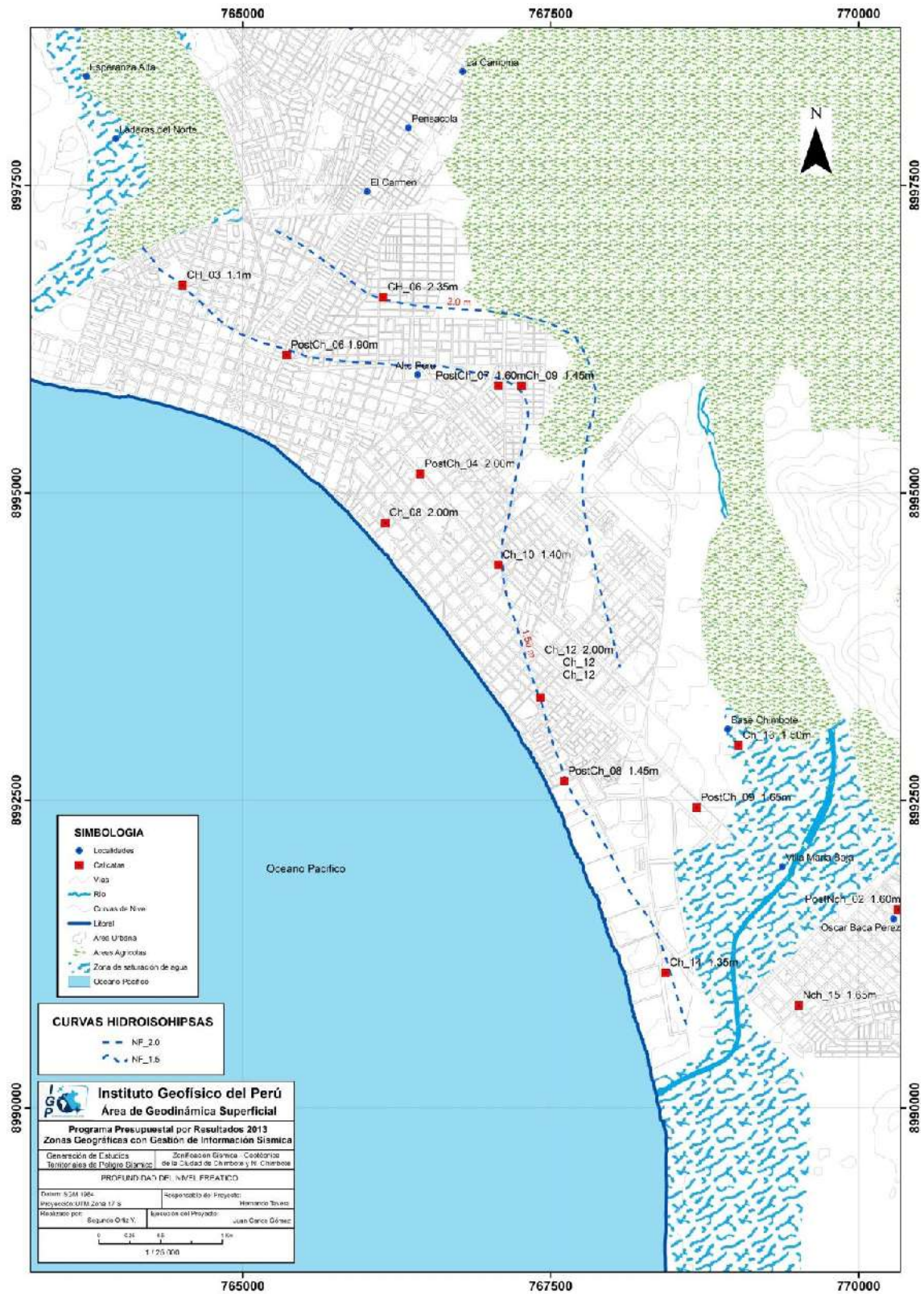


Figura 62: Mapa de niveles freáticos superficiales para la ciudad de Chimbote

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, niveles freáticos, 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 Chimbote.

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 Chimbote, 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 63 se muestra la distribución espacial de los 375 puntos de registro de vibración ambiental obtenidos en campo, cada uno con una duración de 20 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 64 se muestra, como ejemplo el procedimiento seguido para el punto CH-121. En el extremo superior de la figura, se muestra el registro de vibración ambiental para 15 minutos analizado con ventanas de 20 segundos; en el extremo inferior izquierdo, la curva promedio de H/V con su respectiva desviación estándar, resaltando en este caso, las frecuencias predominantes de 1.2 Hz y 3 Hz con amplificaciones relativas de 8 y 2 veces respectivamente. Hacia el extremo inferior derecho de la figura se muestra la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma). En ella se observa que a la frecuencia de 1.2 Hz la energía se irradia en todas las direcciones y enmascarando la energía irradiada a 3.0 Hz. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

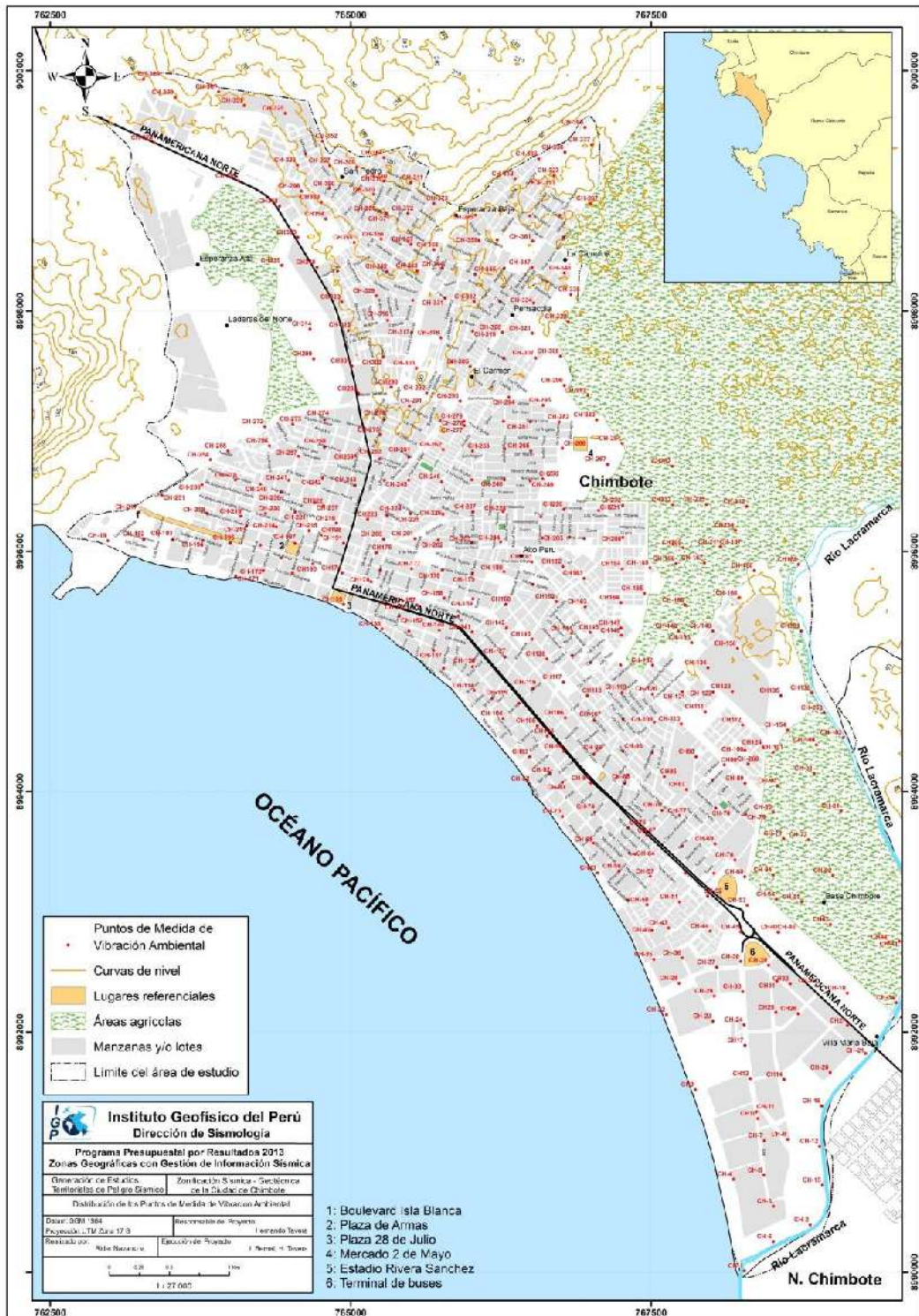


Figura 63: Mapa de la ciudad de Chimbote y distribución de puntos de registro de vibración ambiental

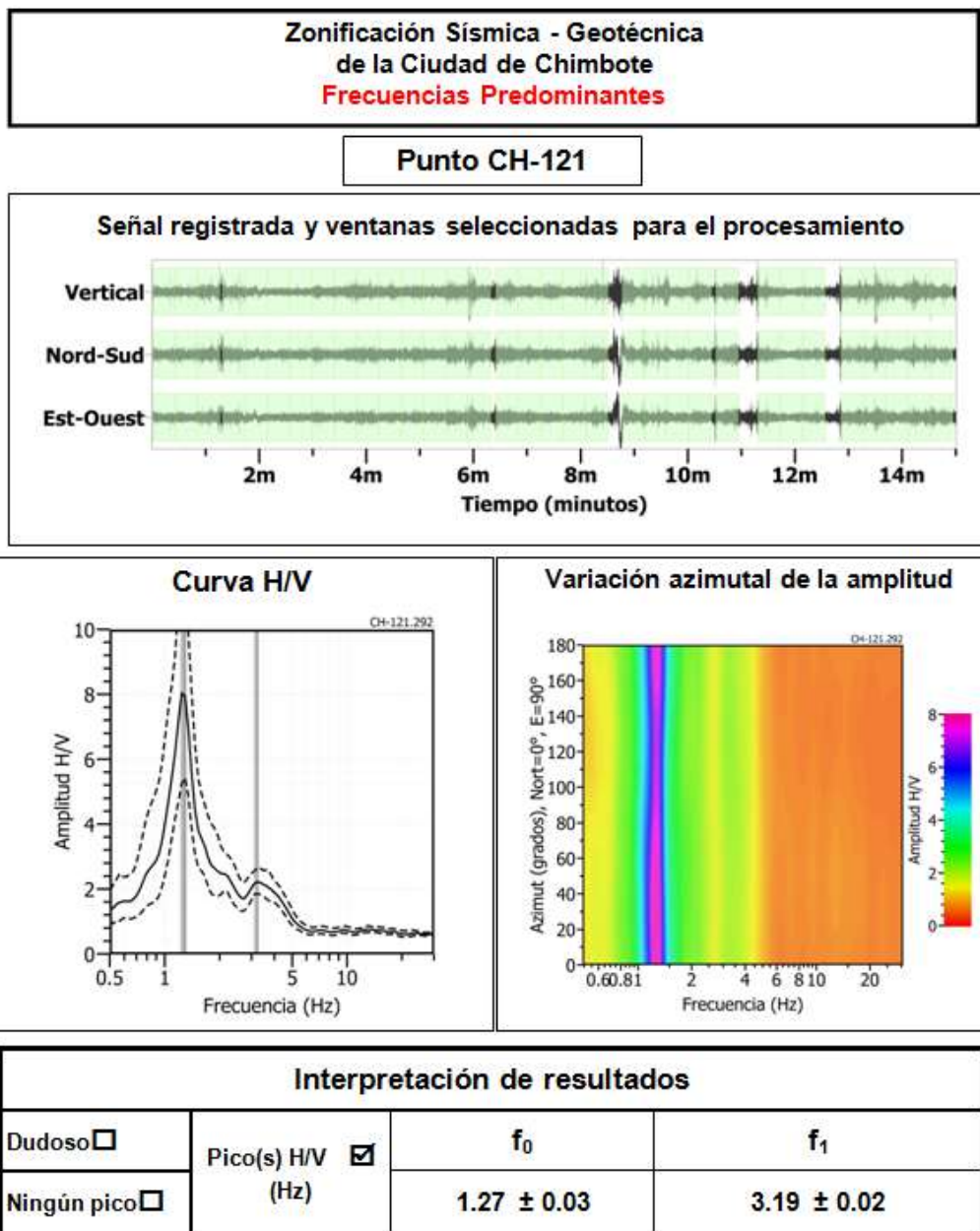


Figura 64: Ejemplo de la ficha H/V para el punto CH-121 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

- 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 que valores similares para las frecuencias predominantes se concentran en diversas áreas de la ciudad, lo cual sugiere que el subsuelo es heterogéneo y por ello, requiere del análisis detallado para comprender su comportamiento dinámico.

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

Para el mejor análisis de la información obtenida de las razones espectrales H/V, se procedió a construir mapas de frecuencias predominantes considerando dos rangos: **F₀** ($F < 3.0\text{Hz}$) y **F₁** ($F > 3.0\text{Hz}$). Esta clasificación se realiza en razón que en varios puntos de medición sobresalen dos y hasta tres picos de frecuencias con amplificaciones similares, lo cual sugiere que el suelo es complejo. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Chimbote.

***- Frecuencias predominantes F₀:** En la Figura 65, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes **F₀** ($F < 3.0\text{Hz}$), todas de manera casi uniforme sobre toda el área de estudio. Únicamente, en los extremos norte y sur de la ciudad sobresalen frecuencias de 2.0-3.0 Hz (valores en rojo) y en el área céntrica de la ciudad, valores de 1.0-2.0 Hz (en azul).*

En la misma figura se resalta los puntos para los cuales se presenta ejemplos de H/V (Figura 66) y en las cuales, se observa la migración de frecuencias entre 1.0 a 3.0 Hz. Estas frecuencias muestran amplificaciones máximas relativas de hasta 5 veces en algunos casos. Las razones H/V obtenidas para los puntos CH-144, CH-309 y CH-356, muestran claramente el predominio de frecuencias en el rango 1.0-2.0 Hz, con amplificaciones máximas relativas de hasta 9 veces, lo cual evidencia la gran flexibilidad de los suelos. Asimismo, en el punto CH-356 se observa la migración de las frecuencias a valores mayores.

Las razones H/V obtenidas para los puntos CH-14, CH-263 y CH-340 muestran claramente el incremento de frecuencias de 2.0 a 3.0 Hz. Para CH-14 la frecuencia predominante está en 2.2 Hz con amplificaciones de hasta 10 veces; mientras que, para CH-263 y CH-340 la frecuencia predominante está en 2.4 a 3.0 Hz con amplificaciones de 5 veces. Esta particularidad sugiere que conforme se tiende a frecuencias mayores, la amplitud disminuye, lo cual evidencia mayor

sensibilidad para la propagación de ondas de periodo largo. Esta particularidad también puede ser debida a efectos de resonancia de ondas por la geometría particular de la bahía de Chimbote.

En la Figura 65, con un recuadro de línea discontinua se delimita un área pequeña ubicada en el extremo de la Plaza de Armas de la ciudad de Chimbote, en donde no se identificó frecuencias predominantes para **F_o**, situación que será discutida posteriormente.

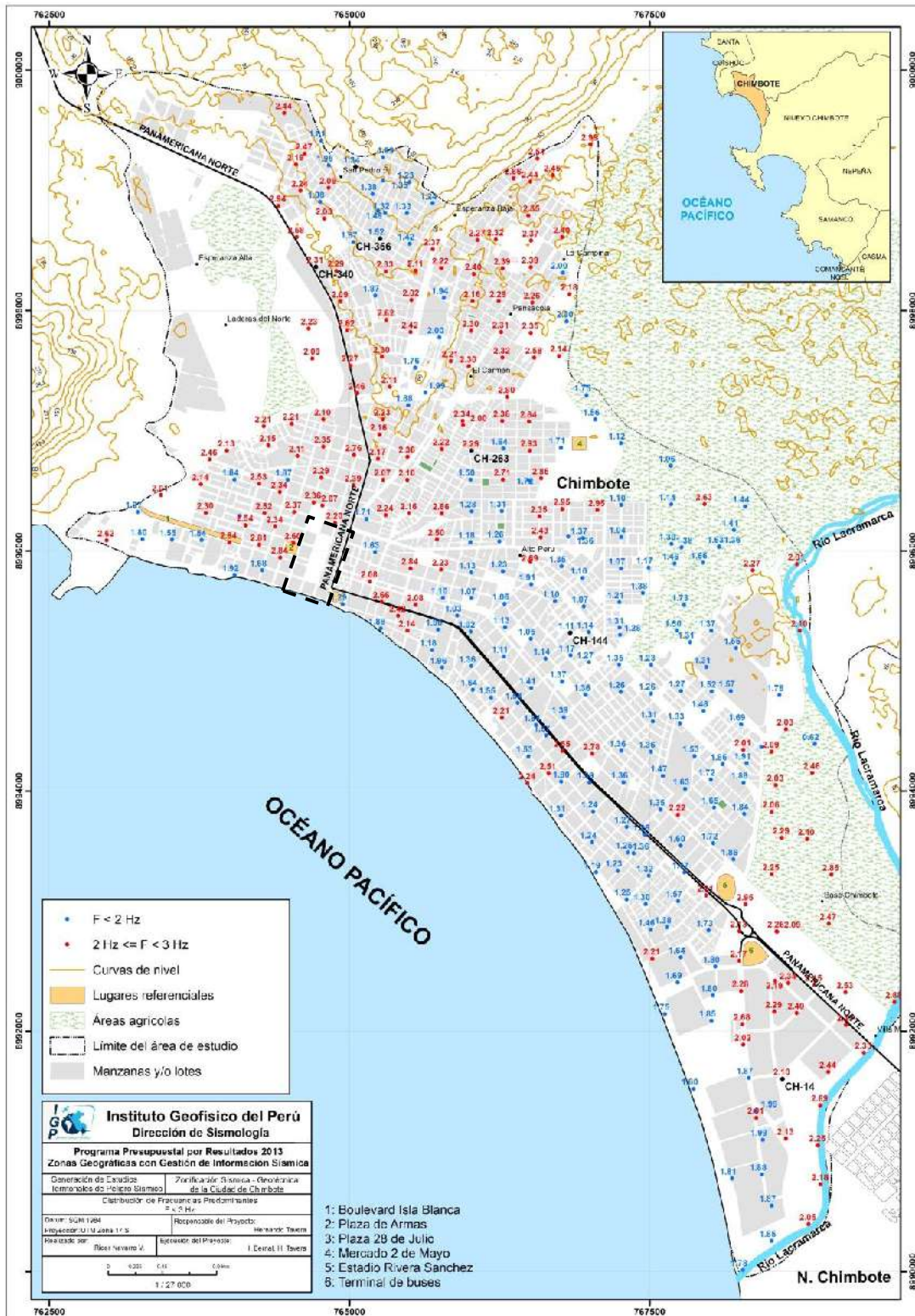
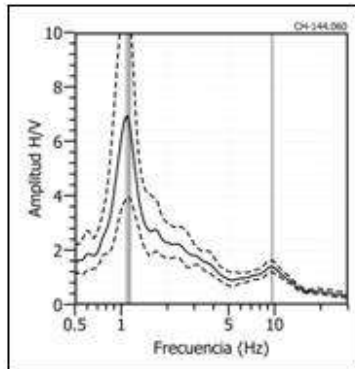
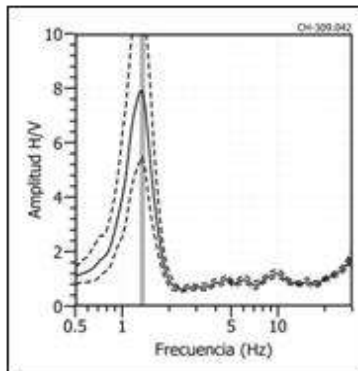


Figura 65: Mapa de la ciudad de Chimbote y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_0 ($F < 3.0 \text{ Hz}$). Los puntos en negro corresponden a ejemplos de H/V de la Figura 66. El recuadro indica la ubicación del área sin valores para F_0 .

CH-144



CH-309



CH-356

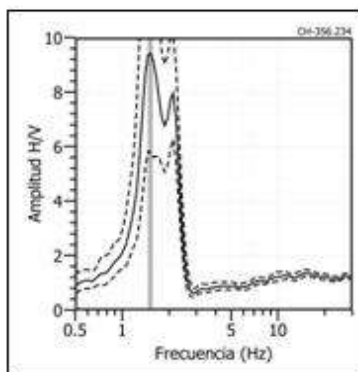
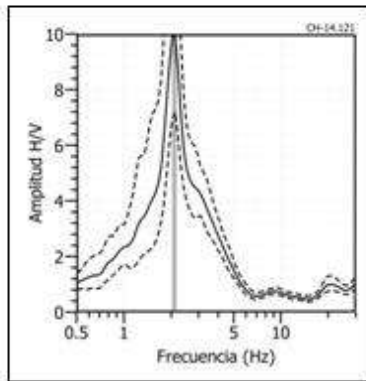
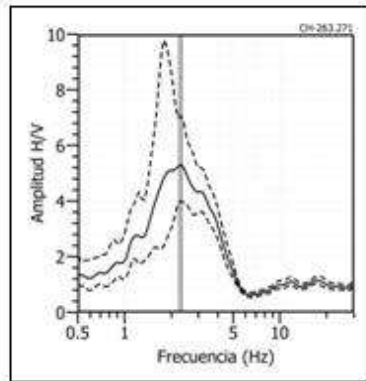


Figura 66: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de frecuencias predominantes F_0 ($F < 3.0$ Hz). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

CH-14



CH-263



CH-340

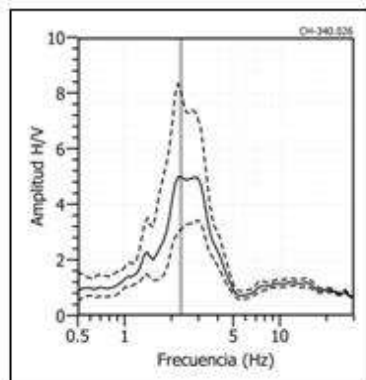


Figura 66: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidos para puntos ubicados próximo a la línea de costa. Frecuencias predominantes F_0 ($F < 3.0$ Hz).

.- Frecuencias predominantes F1: En la Figura 67 se muestra la distribución espacial de los valores de H/V correspondientes a frecuencias predominantes **F1** ($F > 3.0\text{Hz}$), las mismas que se distribuyen de manera uniforme hacia el extremo Norte y Este de la ciudad de Chimbote. Los valores mayores a 4.0 Hz (valores en rojo), se encuentran entre la Plaza de Armas y el Vivero Forestal, y los valores entre 3.1 y 4.0 Hz (valores en azul), se concentran en el extremo Este de la Plaza de Armas y SE de la zona de estudio. En la Figura 67 se resalta, con puntos en negro, aquellas razones H/V para las cuales se ha tomado ejemplos a presentarse en la Figura 68, siendo sus características las siguientes:

En las razones H/V obtenidas para los puntos CH-190, CH-246 y CH-257, ubicados alrededor de la Plaza de Armas, sobresalen las frecuencias de 3.1 Hz con amplificaciones máximas relativas de 3 veces. En el punto CH-257 se observa la migración de la frecuencia predominante de 2.0 a 5.0 Hz. Las razones H/V obtenidas para los puntos CH-132, CH-148 y CH-208 corresponden al extremo SE de la ciudad de Chimbote. En todas ellas sobresalen frecuencias predominantes entre 1.0 a 2.0 Hz y otra entre 3.0 a 5.0 Hz, mostrando mayor amplificación para el primer rango.

En las razones H/V obtenidas para los puntos CH-81 y CH-27, ubicados próximos al río Lacramarca, se observa variaciones importantes en sus frecuencias predominantes. En CH-81 sobresale la frecuencia de 3.0 Hz y conforme se tiende hacia el Este, sobresalen dos picos a 2.5 Hz y 5.2 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 6 y 4 veces respectivamente. La razón H/V obtenida para el punto CH-299, ubicado en el extremo norte de la ciudad -dentro del Vivero Forestal-, muestra forma similar al punto CH-27, pero en este caso, las amplificaciones máximas relativas son de 8 y 5 veces respectivamente.

En general, la complejidad de las curvas de frecuencias predominantes permite considerar que existe migración de **F₀** a **F1**. En este caso la frecuencia **F1** es más notoria y al estar asociada a la presencia de capas y/o estratos superficiales, tiene mayor dominio en el comportamiento dinámico de los suelos en algunas áreas, por ejemplo, próximo al Hotel Chimú.

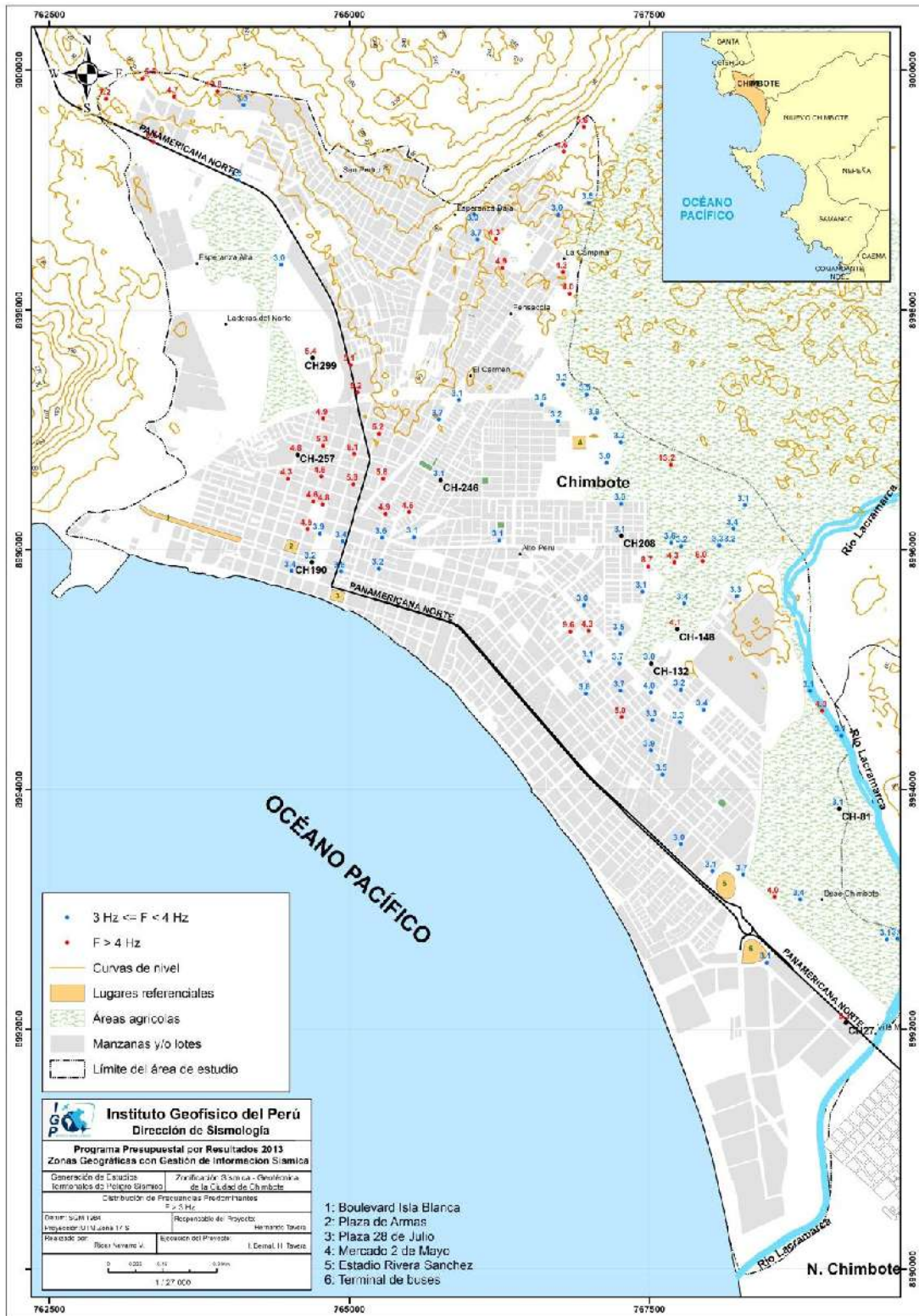
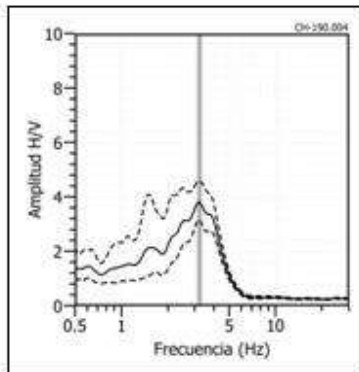
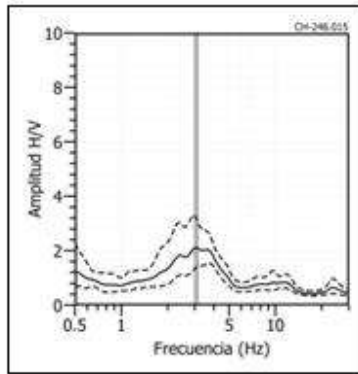


Figura 67: Mapa del área de estudio y distribución espacial de las frecuencias predominantes F_1 ($F > 3.0\text{Hz}$).

CH-190



CH-246



CH-257

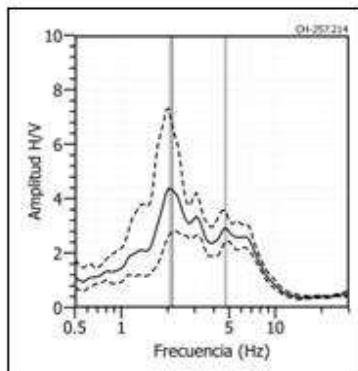
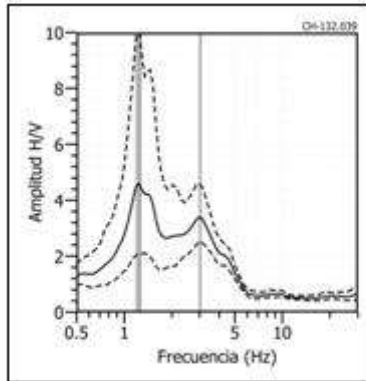
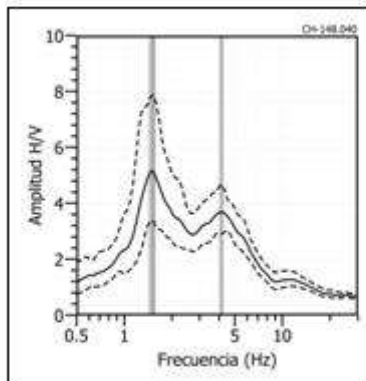


Figura 68: Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango F1 ($F > 3.0$ Hz) obtenidos para puntos ubicados alrededor de la Plaza de Armas de Chimbote. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia que sobresale en este rango.

CH-132



CH-148



CH-208

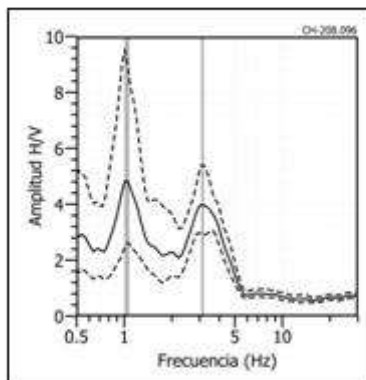
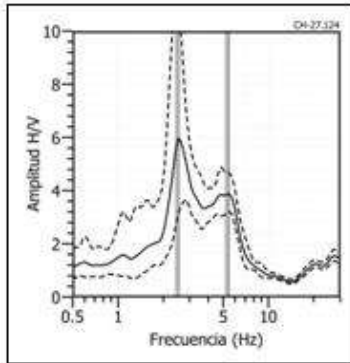
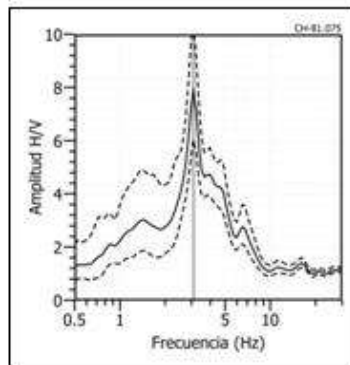


Figura 68: ...Continuación/ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes $F1$ ($F > 3.0\text{Hz}$) obtenidas para los puntos ubicados hacia el extremo SE de la ciudad de Chimbote.

CH-27



CH-81



CH-299

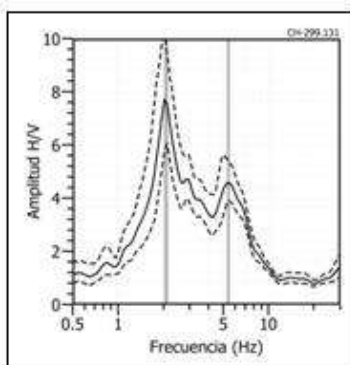


Figura 68: ...Continuación/ Ejemplos de razones espectrales (H/V) en el rango de las frecuencias predominantes **F1** ($F > 3.0\text{Hz}$) obtenidos para puntos ubicados próximos al río Lacramarca. CH-299 en el interior del Vivero Forestal, en el extremo norte de la zona de estudio.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Chimbote caracterizan a suelos dinámicamente inestables. Comparando las Figura 65 y 67, se observa que las frecuencias **F₀** tienen mayor predominio en la ciudad de Chimbote que **F₁**; es decir, existe en casi toda la ciudad una capa de suelo de gran espesor y de manera puntual en algunas zonas, otra de menor espesor definida con la frecuencia **F₁**. Por ejemplo, en los alrededores de la Plaza de Armas, cerca del Hotel Chimú, resalta la presencia de capas inestables definidas por **F₁**, siendo en esta zona en donde se produjo proceso de licuación de suelos durante la ocurrencia del sismo de 1970.

11.2.- 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 69 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Chimbote. Los resultados obtenidos permiten definir la existencia de áreas con periodos menores o iguales a 0.3 segundos (valores en negro) y otras con periodos mayores a 3.0 segundos (valores en azul). Los periodos mayores a 3.0 segundos se distribuyen sobre toda la ciudad de manera uniforme, pero se incrementan a 0.8 segundos en el área céntrica de la ciudad y hacia la línea de costa. Estos valores sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran espesor que domina el comportamiento dinámico de los suelos en la ciudad.

Los periodos menores a 0.3 segundos se concentran en tres áreas: la primera se encuentra en el extremo Este y SE de la ciudad, la segunda entre la Plaza de Armas y el Vivero Forestal, y la tercera, en el extremo Norte de la ciudad. Estos periodos sugieren la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por una capa más profunda y de mayor potencia.

Los periodos dominantes que caracterizan a los suelos de la ciudad de Chimbote 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.

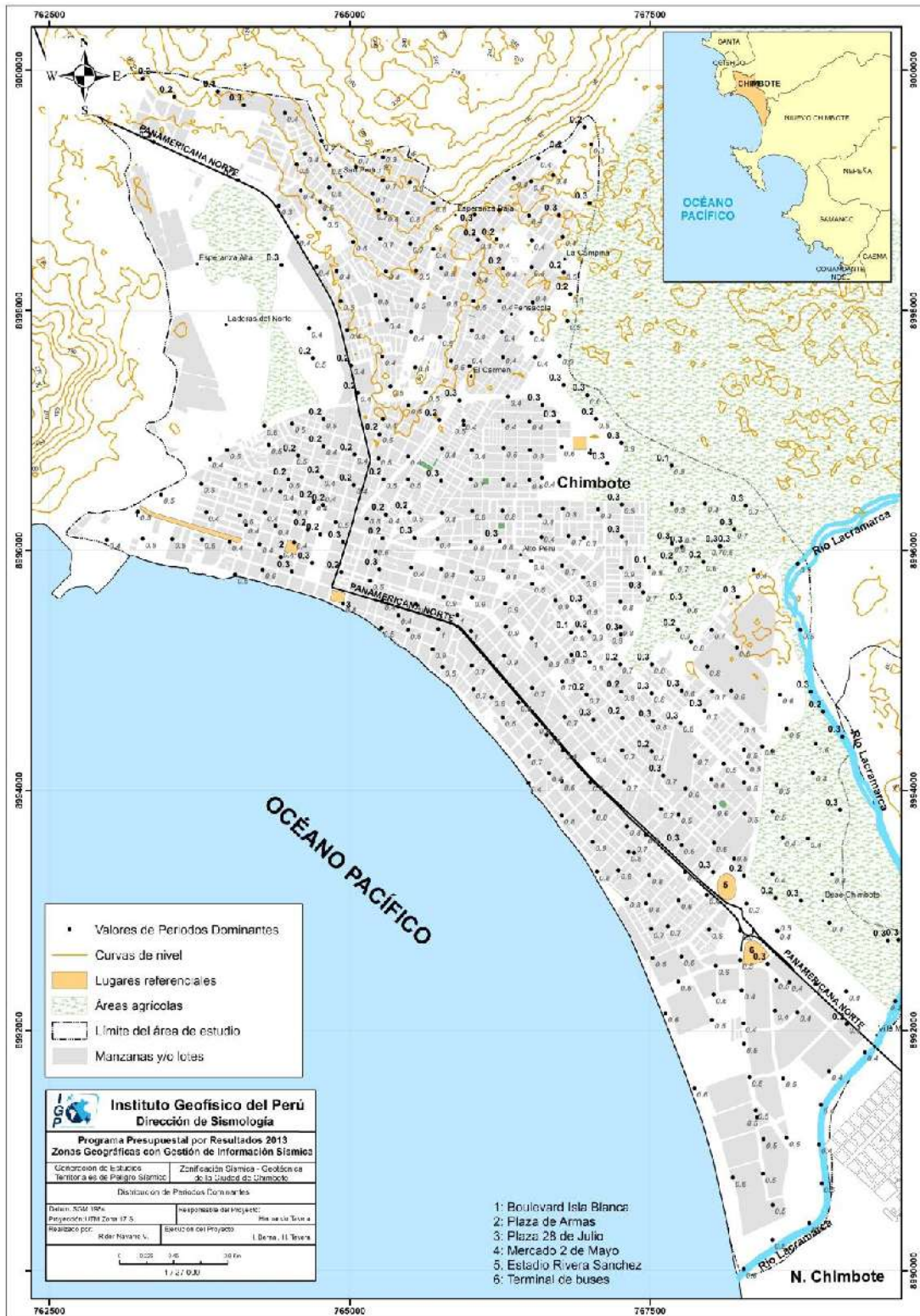


Figura 69: Mapa de la ciudad de Chimbote y distribución espacial de los valores de periodos dominantes

Asumiendo, velocidades de 150 m/s y 200 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.3 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 12 y 18 metros. Estos valores son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los métodos geofísicos (Figura 70).

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 total del área de la ciudad y sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran potencia que domina el comportamiento dinámico de los suelos en la ciudad. Los periodos menores e iguales a 0.3 segundos, se encuentran distribuidos en tres áreas pequeñas: la primera se encuentra en el extremo Este y SE de la ciudad, la segunda entre la Plaza de Armas y el Vivero Municipal, y la tercera en el extremo norte de la ciudad. 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.

11.3.- 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 70, se presenta el mapa de la ciudad de Chimbote con la distribución espacial de 6 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-CH,.. , LR06-CH. En la Figura 71, se presenta imágenes de la toma de datos en campo y un ejemplo de los registros obtenidos.

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

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 Chimbote.

Arreglo Lineal LR01- CH: Este arreglo se realizó en el estadio Gomez Arellano ubicado en el extremo NO de la zona de estudio. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades V_s de 200 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 18 metros y velocidades V_s de 520 m/s. Ambas velocidades sugieren la presencia de suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades V_s de hasta 900 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 72a).

Arreglos Lineales LR02-CH, LR03-CH, LR05-CH: Estos arreglos presentan similares características a pesar de estar ubicados en diferentes áreas. LR02-CH en el distrito San Isidro (Av. Prolongación Alfonso Ugarte y Ramón Castilla), LR03-CH entre las Av. Moquegua y Huancavelica (180 m de la línea de costa) y LR05-CH en el Campo Atlético de Chimbote, próximo a la Av. José Carlos Mariátegui (150 metros de la línea de costa).

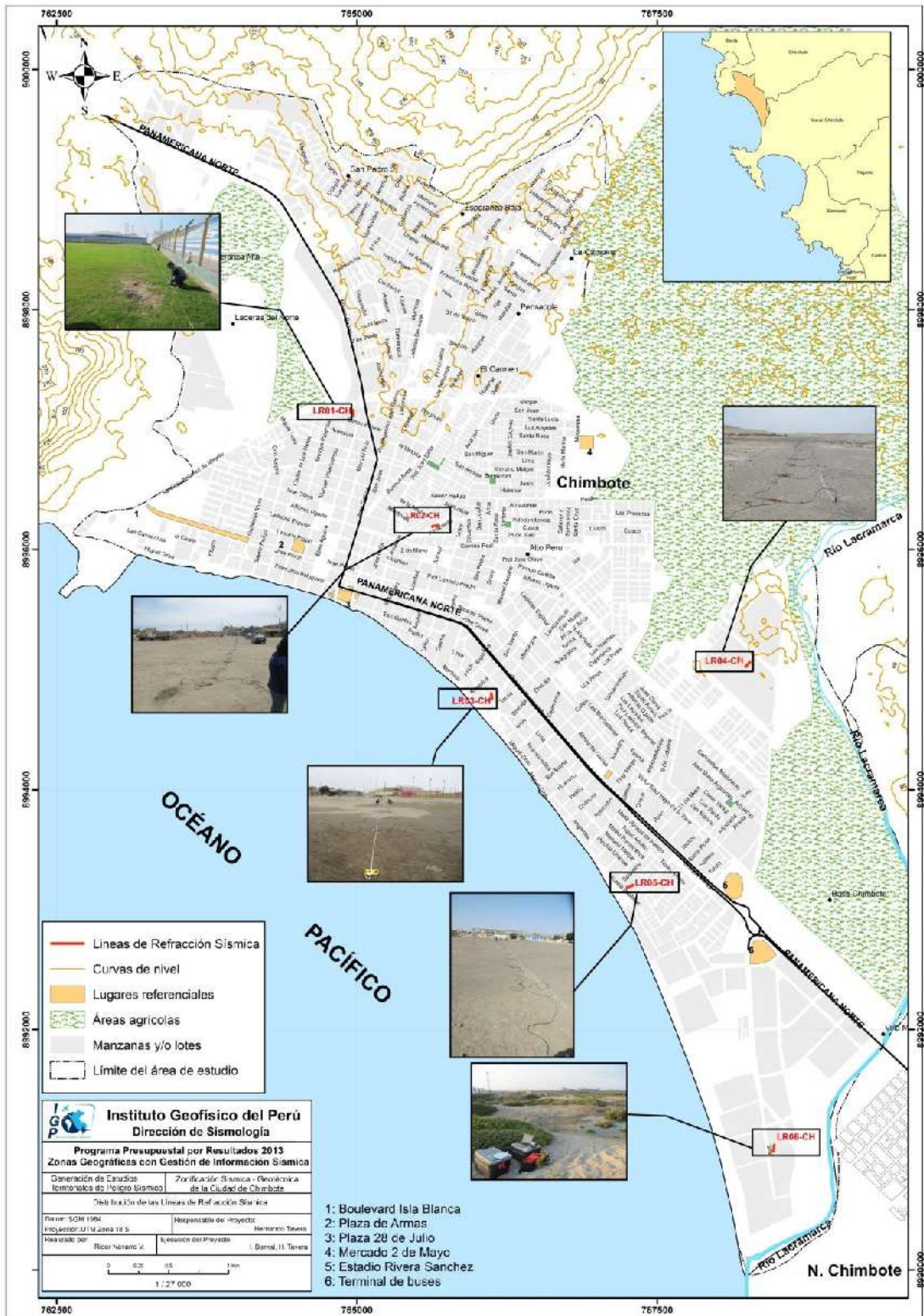


Figura 70: Mapa de la ciudad de Chimbote y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-CH, ..., LR06-CH.

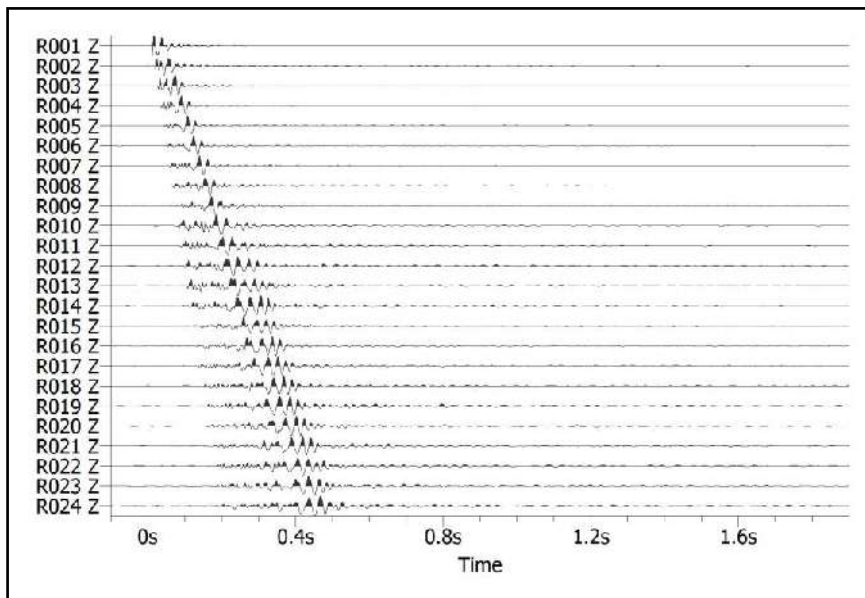


Figura 71: Disposición del equipo de refracción sísmica y registros obtenidos en la ciudad de Chimbote

En los perfiles LR2-CH y LR05-CH se ha identificado presencia de dos capas, la primera con espesor de 4 metros y velocidades V_s de 130 m/s. La segunda capa con espesores de 12 a 15 metros y velocidades V_s de 160 a 170 m/s, ambas corresponden a suelos blandos. En el perfil LR03-CH se identifica una capa superficial de 12 metros de espesor y velocidad V_s de 150 m/s correspondiendo a suelos muy blandos (Figuras 72b, c, d).

Estos resultados evidencian la existencia en el extremo Oeste y en el centro de la ciudad de Chimbote de un suelos superficial muy blando.

Arreglo Lineal LR01 - CH

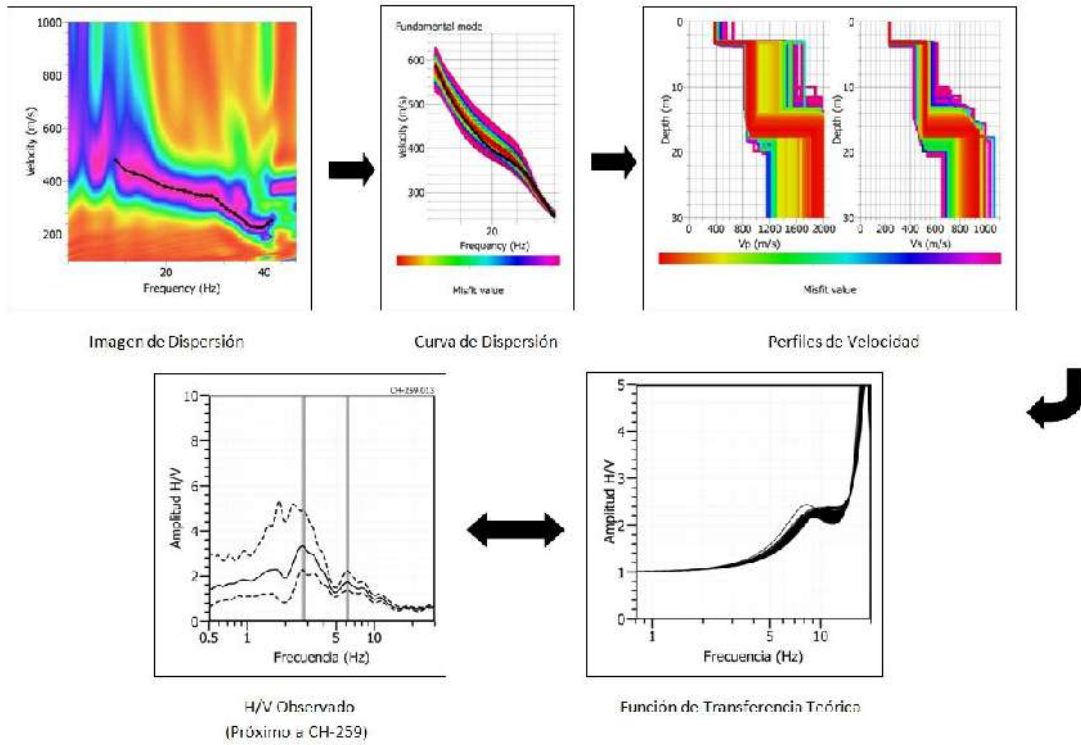


Figura 72a: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR01-CH.

Arreglo Lineal LR02 - CH

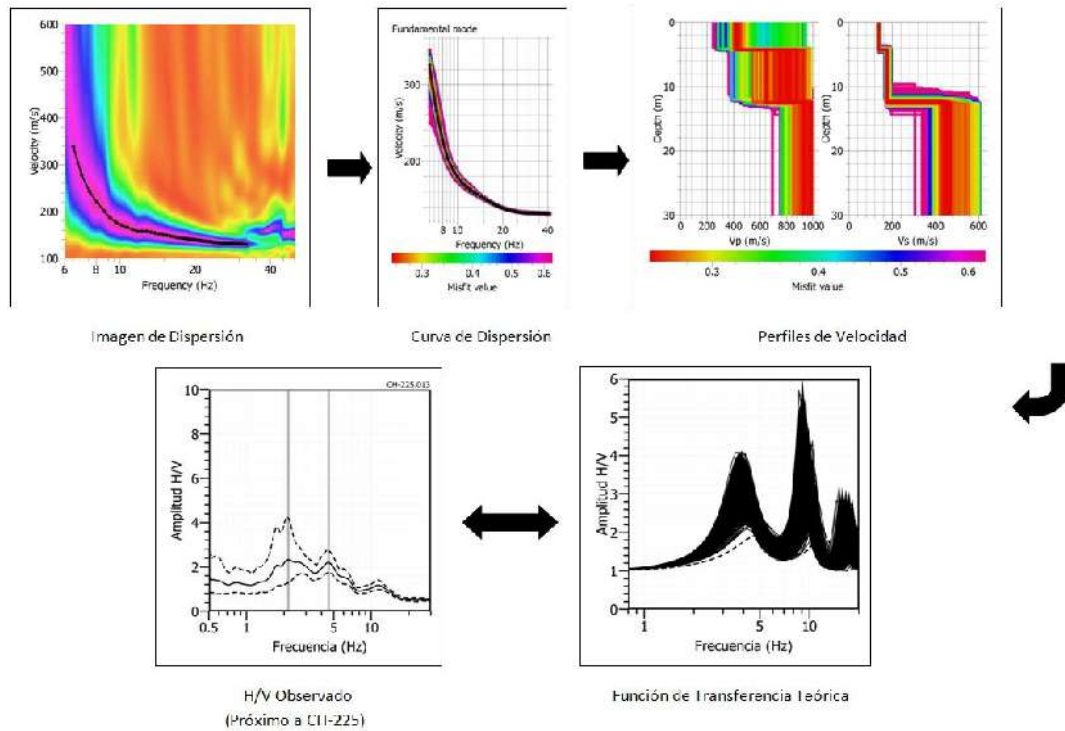


Figura 72b: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR02-CH.

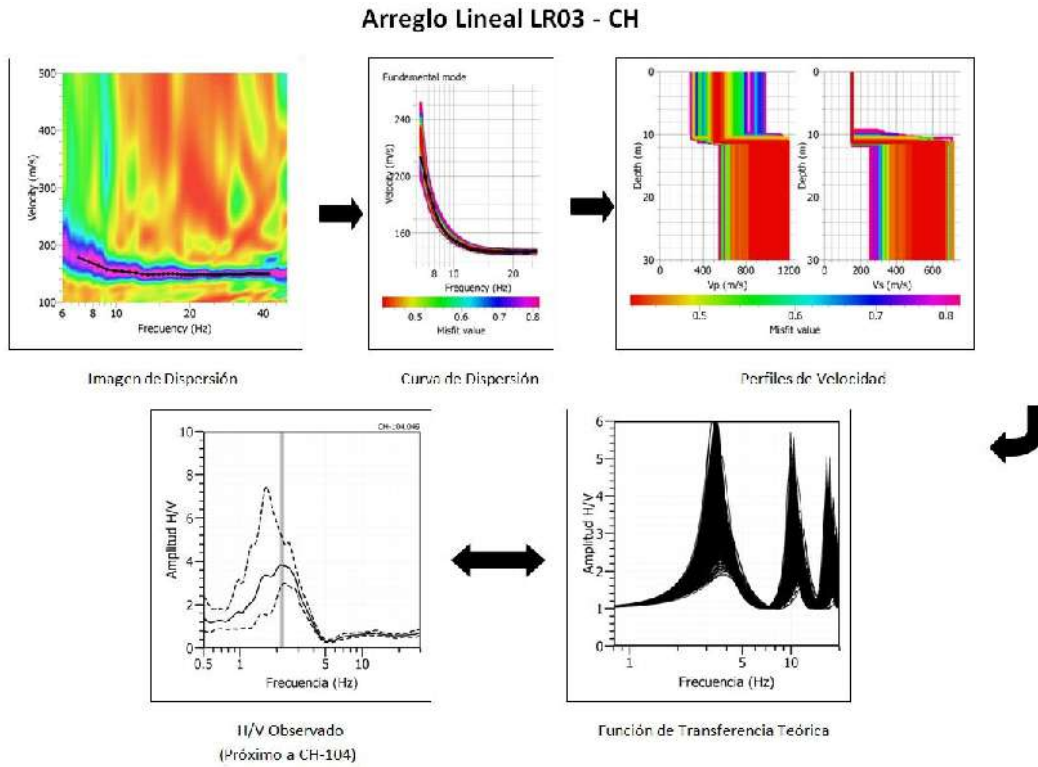


Figura 72c: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR03-CH.

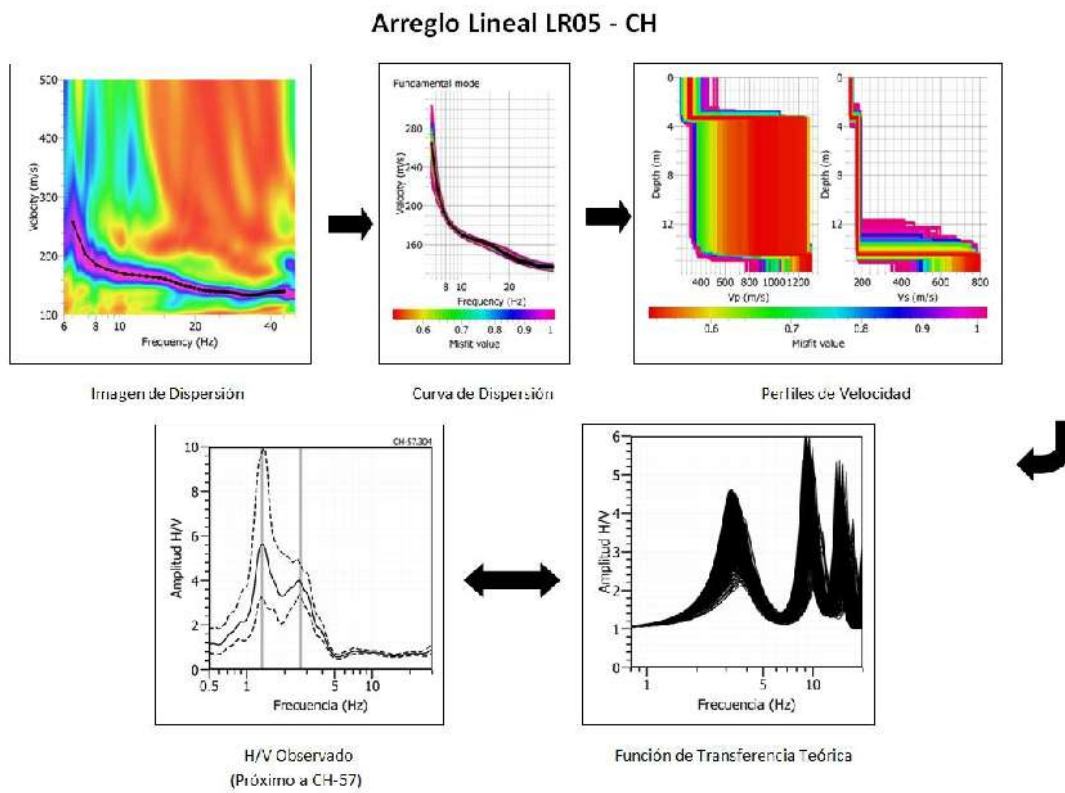


Figura 72d: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR05-CH.

Arreglo Lineal LR04-CH: Este arreglo se realizó en extremo Este de la Av. Huánuco. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 3 metros y velocidades Vs de 170 m/s correspondiente a suelos blandos. La segunda capa presenta un espesor de 8 metros y velocidades Vs de 220 m/s correspondiente a suelos relativamente duros. De acuerdo a la Figura 72e, no existe correspondencia con los valores teóricos de frecuencias predominantes; por lo tanto, se define incertidumbre en los resultados

Arreglo Lineal LR06-CH: Este arreglo se realizó en la zona Industrial, entre la línea de costa y el río Lacramarca. Los resultados muestran la presencia de suelos conformados por dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades Vs de 130 m/s. La segunda capa presenta un espesor de 12 metros y velocidades Vs de 170 m/s. Debido al alto nivel freático observado, ambas capas corresponden a suelos blandos. Según la Figura 72f, no existiría correspondencia entre la función de transferencia teórica y H/V, probablemente debido a la complejidad del suelo por la presencia de altos niveles freáticos.

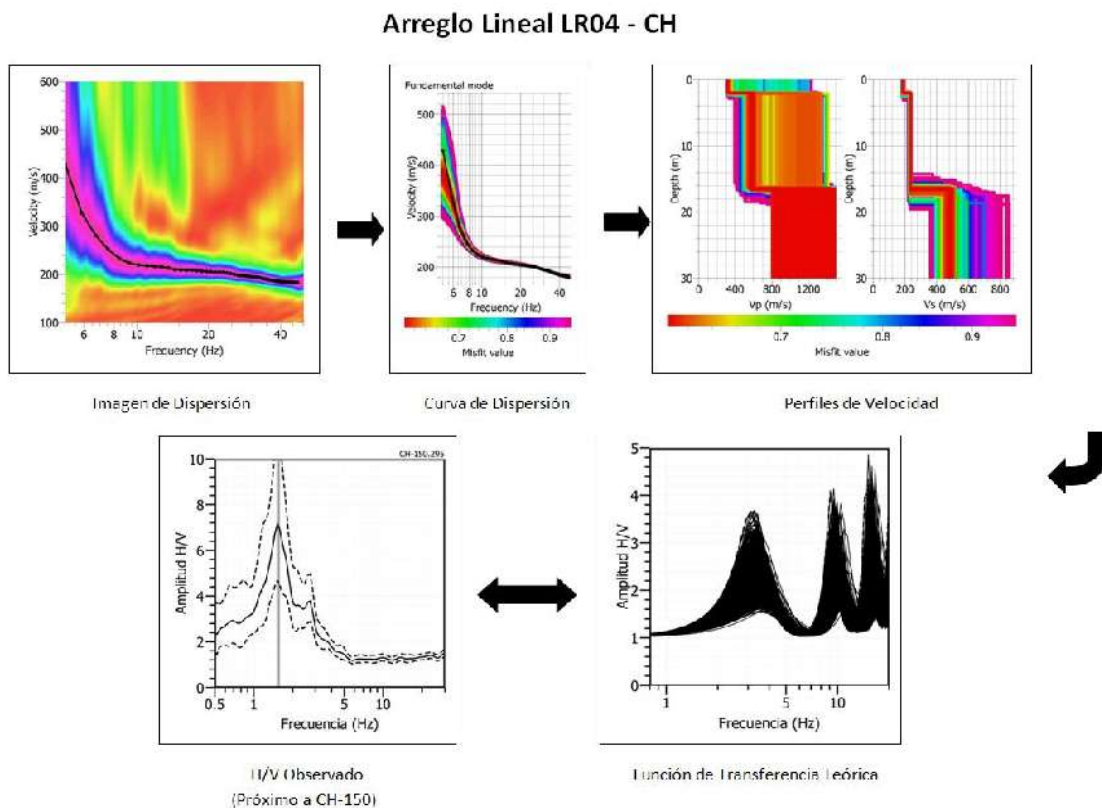


Figura 72e: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR04-CH.

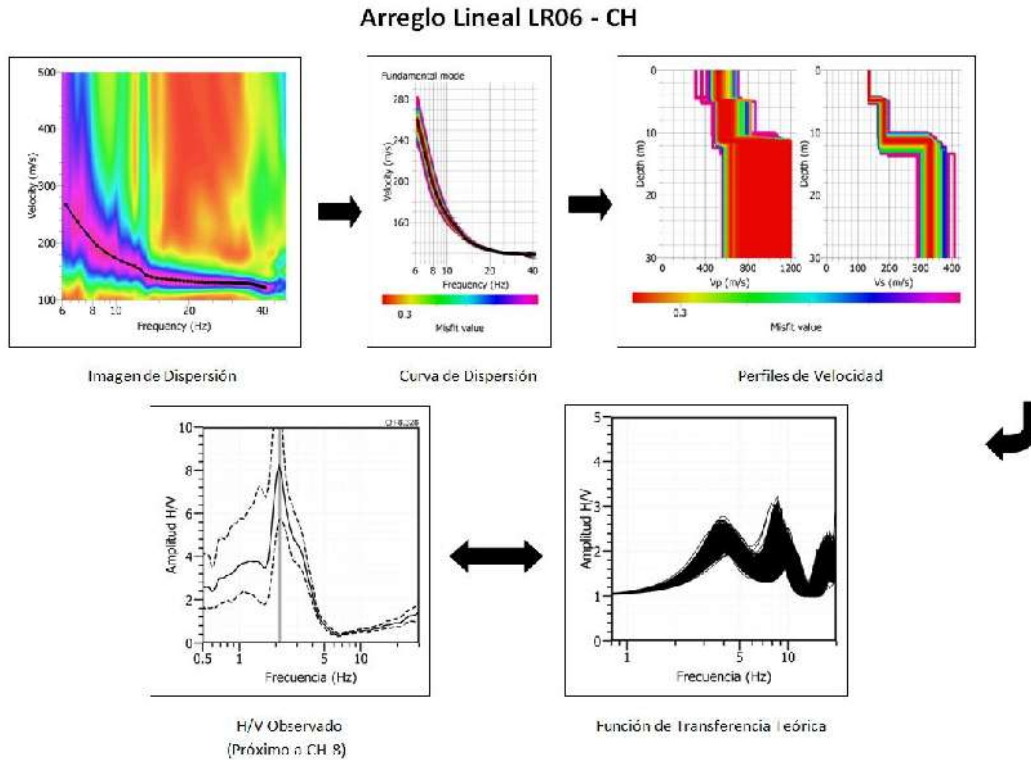


Figura 72f: Análisis e interpretación geofísica obtenida con el método MASW para el arreglo LR06-CH.

Estos resultados indican que en la zona de estudio, los suelos están compuestos por dos capas, la primera superficial con espesores de 4 metros y velocidades de hasta 130 m/s. La segunda capa presenta espesores entre 12 a 18 metros y velocidades que fluctúan entre 160 a 200 m/s. Ambas capas presentan suelos muy blandos. La superficie de contacto con la capa más profunda alcanza velocidades V_s de 520 m/s correspondiente a suelos muy duros o rocas blandas.

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 Chimbote se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y su distribución se muestra en la Figura 73. Para las líneas se consideró un espaciamiento de 3 metros entre electrodos sobre un tendido longitudinal de 72 metros, lo cual permitió tener alcances en profundidad del orden de 13 metros.

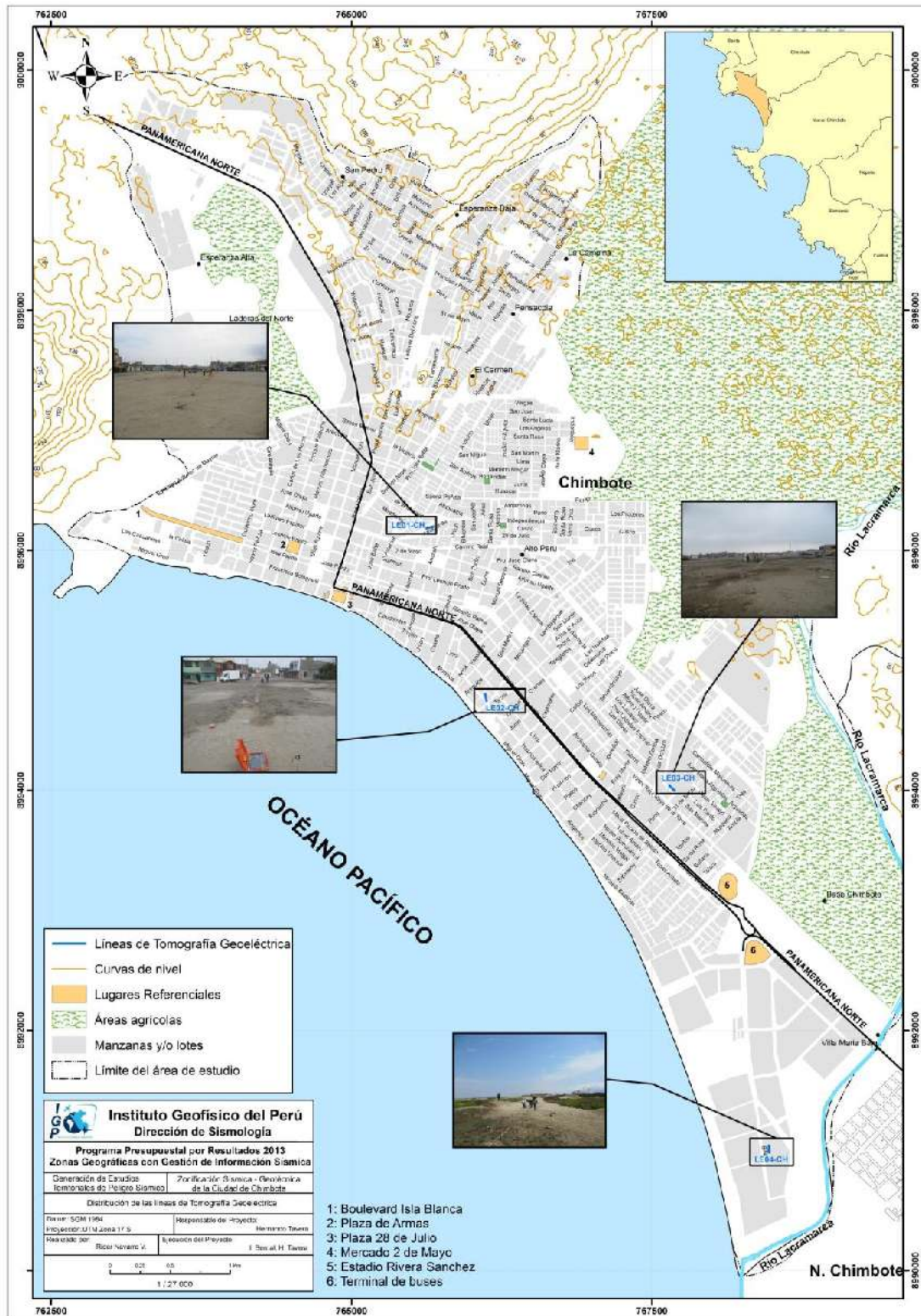


Figura 73: Mapa de la ciudad de Chimbote y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica: LE01-CH, LE02-CH, LE03-CH y LE04-CH.

Para el procesamiento de la información recolectada se ha hecho uso de los algoritmos de inversión DCIP2D y OASIS MONTAJ. Las principales características de cada línea de tomografía eléctrica son:

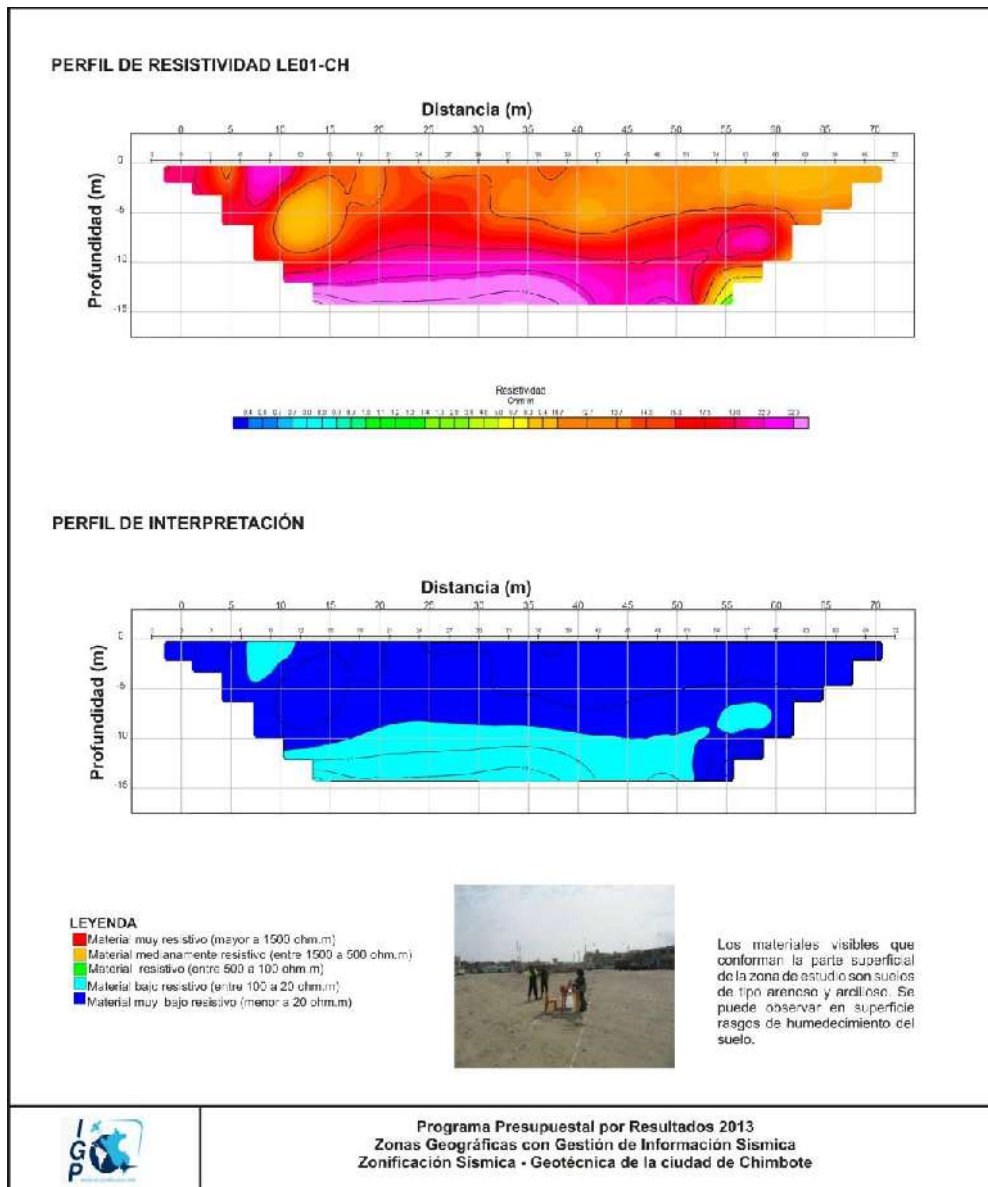


Figura 74a: Línea de Tomografía Eléctrica LE01-CH tomada en el extremo NE de la Plaza de Armas de la ciudad de Chimbote.

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-CH: Línea tomada en dirección NE de la Plaza de Armas de Chimbote y se caracteriza por presentar valores de resistividad bajos a muy bajos, los mismos que tienden a incrementarse en profundidad. Estos valores varían entre 1.55 a 35.5 ohm.m, predominando 20 ohm.m. En el extremo superior de la sección se concentran valores de resistividad de 10 y 20 ohm.m, los

cuales se extienden uniformemente hasta una profundidad de 10 m. A mayor profundidad, se observa que los valores se incrementan ligeramente hasta los 30 ohm.m. De manera muy puntual se puede apreciar valores menores a 10 ohm.m en el extremo inferior de la sección, a la altura del punto de registro número 54 (Figura 74a).

Los valores de resistividad en superficie corresponderían a la presencia de suelos saturados ($\rho_w=10-100 \text{ ohm.m}$) o con buen porcentaje de material orgánico. En profundidad los valores definen la presencia de suelos ligeramente más resistivos; debidos principalmente a niveles de saturación, variación en la permeabilidad de los materiales o de porosidad a fin de que permita concentrar más fluidos.

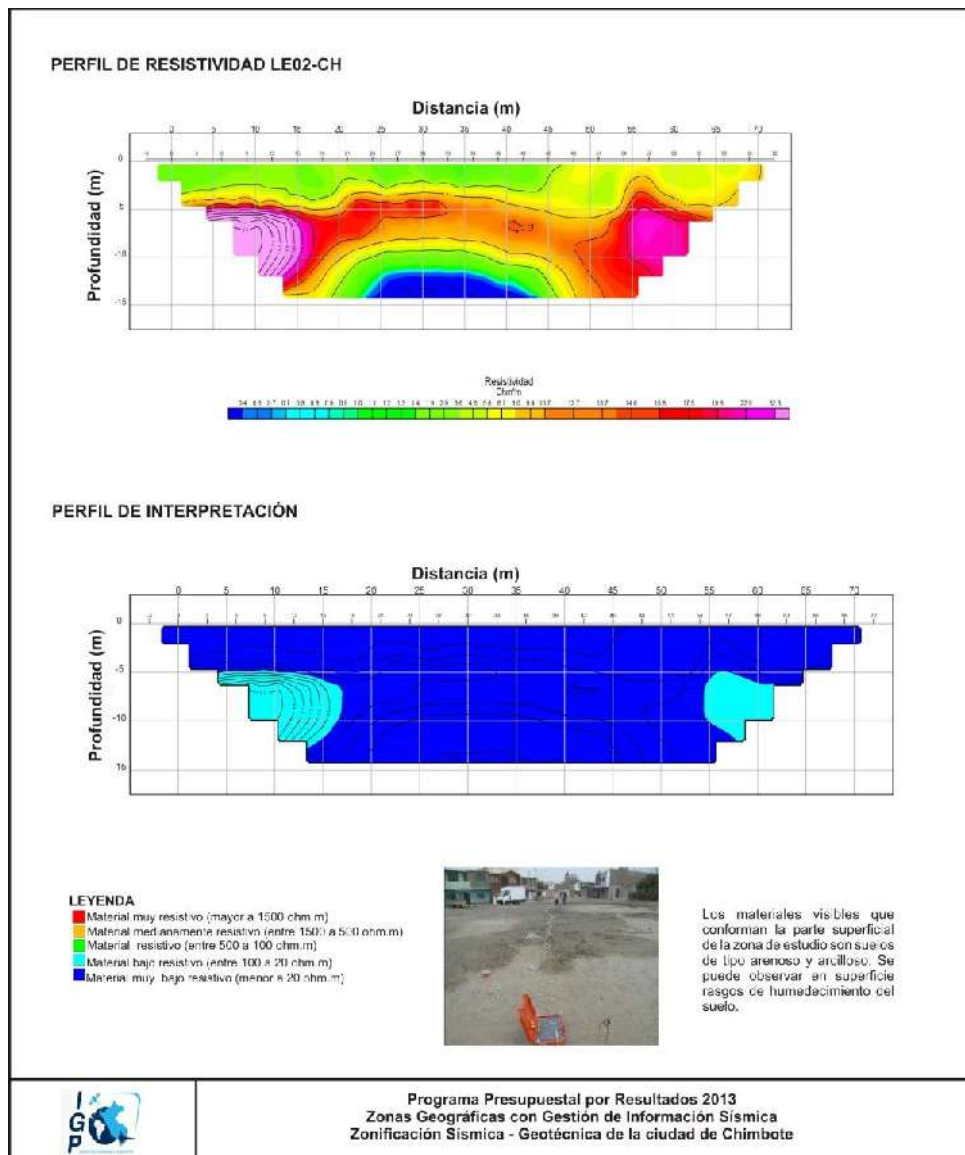


Figura 74b: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE02-CH tomada en el extremo Oeste de la zona céntrica de la ciudad de Chimbote.

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE02-CH: Línea tomada en el extremo Oeste del área urbana de Chimbote, próxima a la línea de costa, la misma que se caracteriza por presentar valores de resistividad muy bajos. Los valores varían entre 0.02 y 50.94 ohm.m., con predominio de valores menores a 15 ohm.m. En el extremo superior de la sección predominan valores de 10 ohm.m, que se extienden casi uniformemente hasta una profundidad de 4 m. A mayor profundidad, los valores se incrementan, en la parte central de la sección a 15 ohm.m y hacia sus extremos, hasta valores de 50 ohm.m y 30 ohm.m. Por debajo de 10 m de profundidad, aparecen valores menores a 1ohm.m, principalmente en el centro de la sección (Figura 74b).

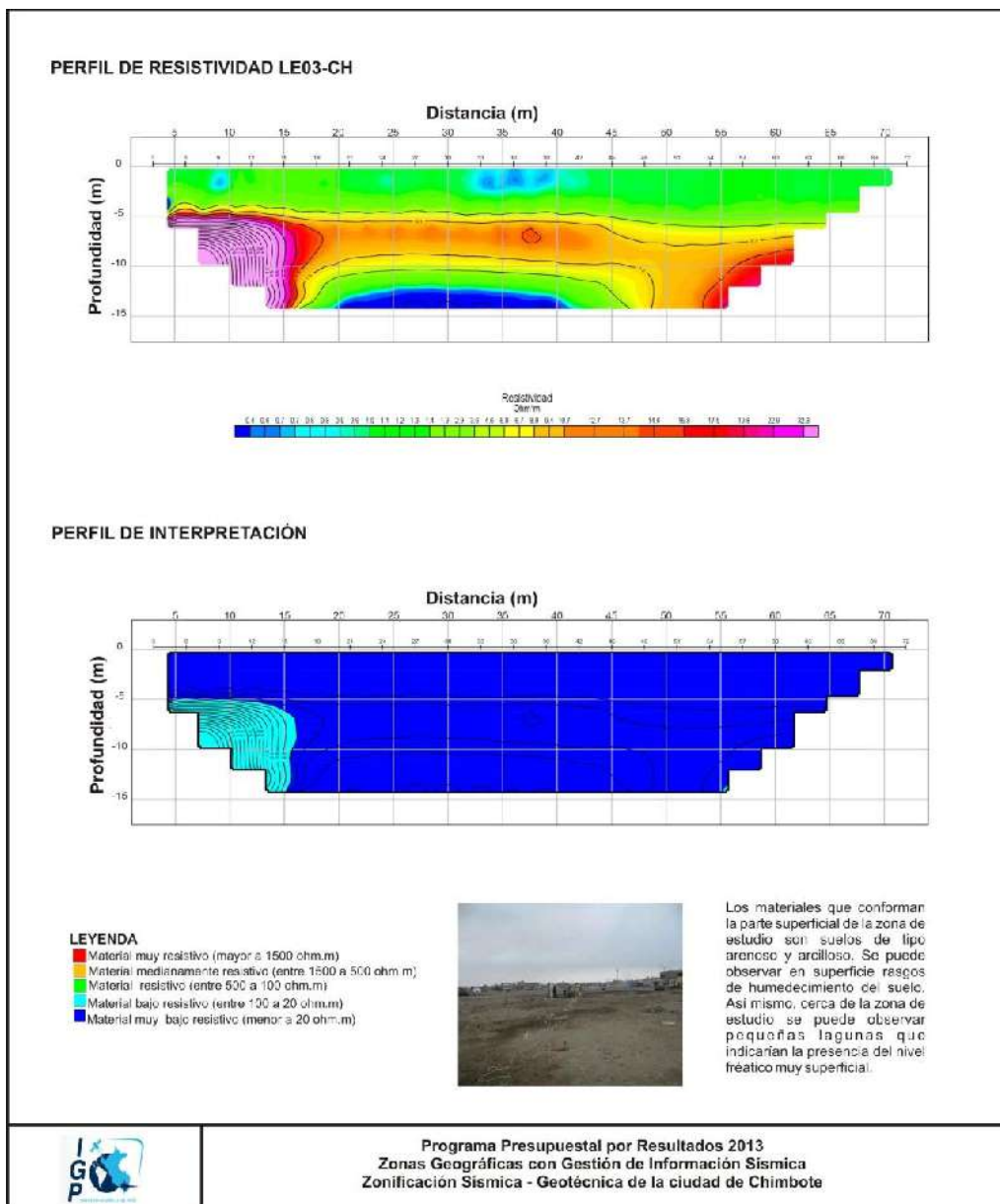


Figura 74c: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE03-CH tomada en el extremo Este de la zona central de la ciudad de Chimbote.

Para esta zona y en profundidad, los valores se presentan menos resistivos indicando la presencia de suelos saturados de agua. Dichos valores son similares a los propuestos por Loke (2004) para suelos con contenido de agua de mar ($\rho_w\text{-mar}=0.2$ ohm.m).

-Líneas de Tomografía Eléctrica LE03-HCH: Línea tomada en el extremo Este del área central de la ciudad y se caracteriza por presentar valores de resistividad muy bajos. Estos valores varían entre 0.09 y 111.65 ohm.m., similar a la línea LE02-CH, con el predominio de valores menores a 15 ohm.m. En el extremo superior de la sección se identifican valores de resistividad menores a 10 ohm.m, que se extienden casi uniformemente hasta una profundidad de 5 m. A mayor profundidad, los valores se incrementan en la zona céntrica de la sección a 12 ohm.m a la profundidad de 10 m y hacia sus extremos, llega a valores de 100 ohm.m y 15 ohm.m. a una profundidad de 12 m. En la parte central de la sección y a mayor profundidad, aparecen valores menores a 1ohm.m. (Figura 74c).

Estos valores bajos de resistividad estarían asociados a la presencia de suelos con contenido de agua salada.

.- Línea de Tomografía Eléctrica LE04-HCH: Línea tomada en el extremo Sur del área de estudio, entre la línea de costa y el río Lacramarca, y se caracteriza por presentar valores de resistividad muy bajos. Los valores varían entre 0.21 y 1.66 ohm.m., con predominio de valores menores a 1 ohm.m. La sección muestra en su parte superior valores menores a 1.0 y 1.6 ohm.m, que se extienden uniformemente hasta una profundidad de 2 m. A mayor profundidad, los valores disminuyen hasta 0.2 ohm.m. (Figura 74d).

Al igual que en líneas anteriores, los valores bajos de resistividad definen la presencia de suelos con contenido de agua salada.

Los resultados indican que los suelos en la zona de estudio se caracterizan por presentar resistividades bajas a muy bajas. Asimismo, permiten identificar la presencia de un horizonte superficial de aproximadamente 4 metros con resistividad muy baja asociado a suelos de tipo arenoso, arcilloso, poco compactado y con un alto nivel freático. Subyace a este suelo, una capa de relativa resistividad debido a variaciones de permeabilidad y porosidad de los materiales que conforman el substrato. En los

perfiles próximos a la línea de costa, sobresalen valores menos resistivos asociados a suelos con contenido de agua proveniente del mar.

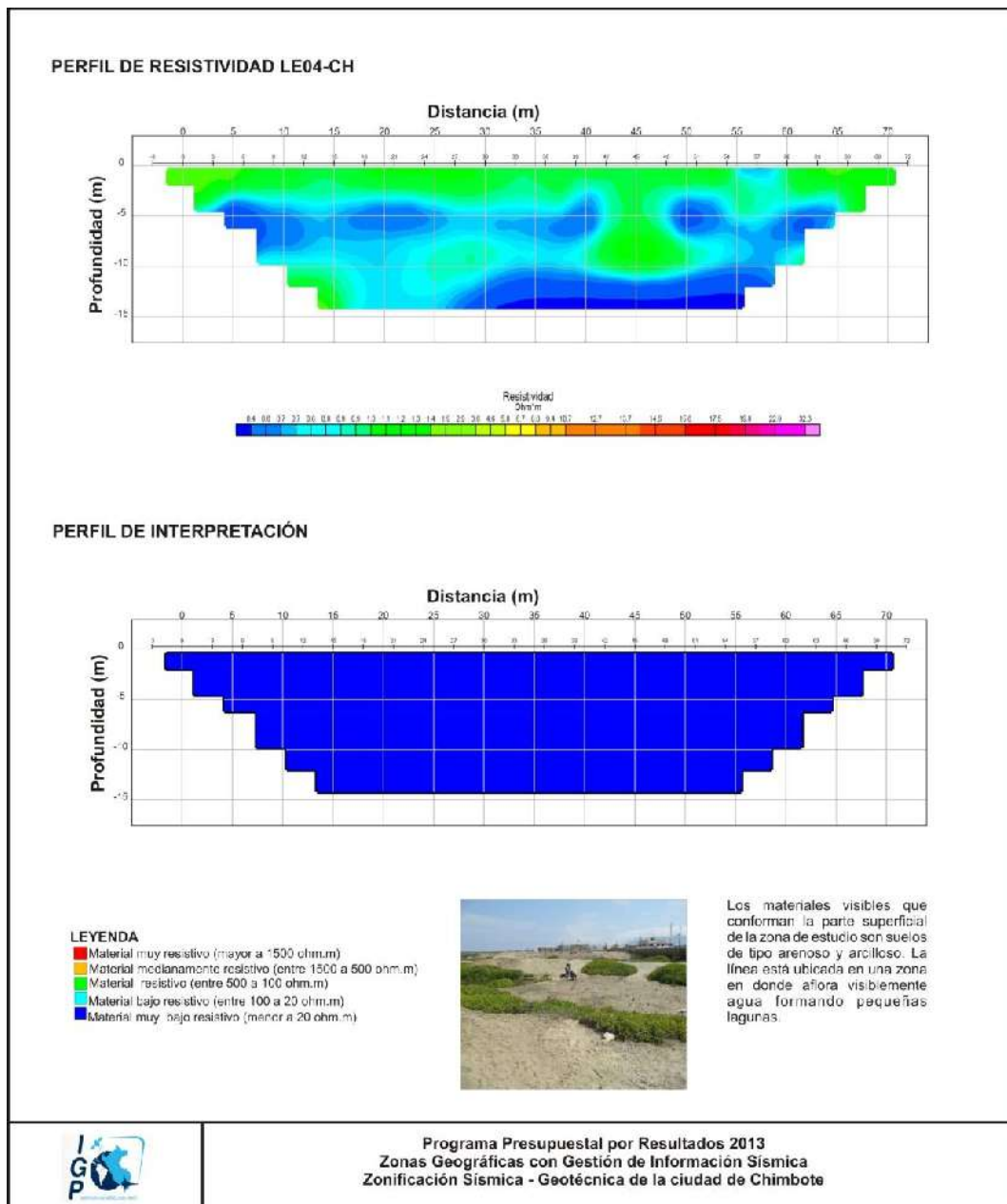


Figura 74d: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE04-CH tomada en el extremo sur de la ciudad de Chimbote y entre la línea de costa y el río Lacramarca.

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Chimbote considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Chimbote, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de tres tipos de suelos: Tipo S2, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

Para la ciudad de Chimbote se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 75):

ZONA I: *Esta zona corresponde a suelos Tipo S1, los mismos que no han sido identificados en este estudio.*

ZONA II: *Conformada por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 16.0 m., subyaciendo a estos estratos se tiene arenas densas cimentadas. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de vibración ambiental, varían entre 0.25 y 0.4 s, con velocidades de ondas de corte (V_s) que varían entre 180 y 250 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. Conforme se tiende hacia el río Lacramarca (extremo sur de la ciudad) y hacia el Vivero Forestal (extremo norte de la ciudad), el nivel freático se encuentra a menos de 4 metros de profundidad según los estudios de resistividad. En el extremo Este de la zona céntrica de la ciudad, los suelos presentan capacidad portante de media.*

ZONA III: *Conformada en su mayor parte por depósitos de suelos finos y arenas que se encuentran en estado moderadamente cementando a suelto, y con espesores que varían entre 10 y 20 metros. Subyace a esta capa un estrato más competente compuesto principalmente por gravas. Los periodos predominantes encontrados en estos suelos varían entre 0.4 y 0.7 s, y las velocidades de las ondas de corte (V_{s30}) son menores a 180 m/s. por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana.*

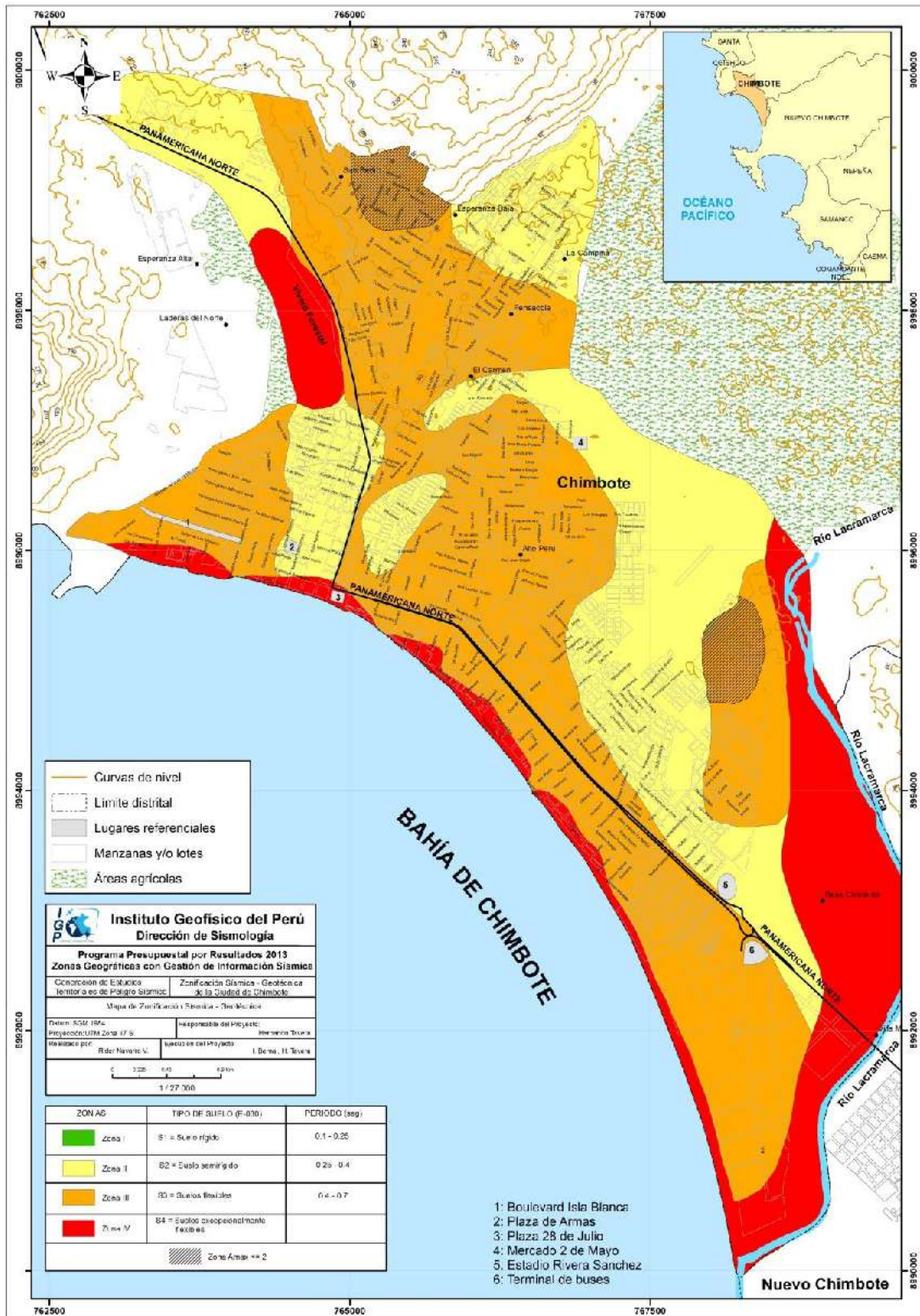


Figura 75: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Chimbote

De acuerdo a estudios geo-eléctricos, la zona presenta suelos de baja a muy baja resistividad debido a que el nivel freático se encuentra a poca profundidad. La presencia de arenas finas sueltas a distintas profundidades, definen a suelos con alto potencial a procesos de licuación. En esta zona, los suelos presentan baja capacidad portante.

ZONA IV: *Conformada por depósitos de arena eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. El comportamiento dinámico ha sido tipificado como un suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E.030, es un caso especial y/o condiciones excepcionales). Según los perfiles geo-eléctricos, los suelos de la zona presentan muy baja resistividad debido a un nivel freático muy alto, observándose en algunas zonas afloramientos de agua y pantanos. En las proximidades del río Lacramarca y Vivero Forestal, el subsuelo está compuesto por arenas saturadas, cubiertas por capas delgadas de limo orgánico. Adicionalmente, estos suelos son afectados por la filtración del agua de mar. En esta zona considerara 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 requiere un estudio específico.*

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

Aspectos Geomorfológicos

La ciudad de Chimbote se asienta sobre una superficie que tiene varios rasgos geomorfológicos como llanuras aluviales entorno al río Lacramarca, colinas cubiertas por arenas eólicas hasta alturas de 80 m.s.n.m., pantanos y dunas. En la zona costera, la mar ha formado líneas de playas recientes y fácilmente diferenciables de las antiguas. La ciudad está rodeada de estribaciones en cuyo basamento se encuentran rocas volcánicas intrusivas que tienen alturas de hasta 500 m.s.n.m.

Aspectos Geológicos:

La ciudad de Chimbote se encuentra sobre derrames andesíticos de la Formación La Zorra y por rocas intrusivas (gabrodioritas y tonalitas), ambas pertenecientes al Cretáceo Inferior y que afloran en los extremos Norte y Sur de la ciudad. Sobre esta unidad se tiene depósitos aluviales, coluviales y eluviales. En el borde costero se reconocen depósitos marinos y eólicos que cubren algunos afloramientos rocosos. En la zona también se encuentran depósitos antrópicos provenientes de rellenos sanitarios y desmontes.

Aspectos Geodinámicos:

En la ciudad de Chimbote se ha identificado los siguientes eventos geodinámicos: caída de rocas, arenamiento eólico, erosión marina y suelos saturados con probabilidad de licuación.

La construcción de escenarios extremos por inundación del río Lacramarca considera un caudal mínimo de inundación de 20 m³/seg que afectaría a la margen izquierda del río, pudiendo afectar básicamente terrenos agrícolas.

Aspectos Geotécnicos:

El análisis de suelos ha permitido identificar en la ciudad de Chimbote, la existencia de tres tipos de suelo: SP, arenas mal gradadas; SM, arenas limosas, mezcla de arenas y limos; SM, arenas pobremente graduadas.

En la ciudad de Chimbote los suelos que la conforman presentan de baja a alta capacidad portante. Los suelos con alta capacidad portante están presentes en Paseo del Mar a espaldas de la Urb. Los Domos, pudiendo construirse viviendas con más de tres pisos.

Los suelos con capacidad portante media están presentes en los AAHH 16 de Diciembre, Urb. El Carmen, San Isidro, 10 de Setiembre, Alto Perú y PPJJ Dos de Mayo. En estos suelos es posible considerar viviendas hasta de tres pisos.

Los suelos con baja capacidad portante se encuentran en toda la zona urbana de Chimbote, por ejemplo en donde se encuentran los AAHH San Pedro, Esperanza Baja, Esperanza Alta, La Unión, César Vallejo, Miramar, Miamar Bajo, Ciudad de Dios, Florida baja, Tres Estrellas, La Florida, Señor de los Milagros, La Libertad, San Juan y Villa España. Del mismo modo, PPJJ Pueblo Libre. El suelo es recomendable para la cimentación de viviendas hasta de dos pisos.

Aspectos Sísmológicos y Tsunamis:

El borde occidental de la región central del Perú, se constituye como la de mayor índice de sismicidad, habiendo dado origen en el pasado a sismos históricos como los de 1582 y 1746 que afectaron toda la zona costera. Posteriormente, los sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970 y 1974; aunque de magnitud moderada (Mw~7.5), causaron daños en varias ciudades costeras, en el caso de la ciudad de Chimbote en viviendas de adobe y quincha. Estos sismos generaron tsunamis con diferentes características que afectaron a la zona costera. De estos

sismos, el que causó mayores daños estructurales, efectos secundarios y mortandad fue el de mayo de 1970.

Para la construcción del escenario de tsunami se considera la ocurrencia de un sismo de $M_w=8.5$. El tsunami generaría olas que llegarían a la zona costera de la ciudad de Chimbote en 23-25 minutos con alturas del orden de 6 metros en las Bahías de Chimbote y Samanco.

Los niveles de inundación horizontal indican distancias de hasta 2 km a lo largo de las Bahías de Chimbote y Samanco. De acuerdo al escenario propuesto, a la altura de la Playa Anconcillo, la inundación pondría en comunicación a ambas bahías.

Aspectos Sísmicos y Geofísicos:

El análisis de razones espectrales H/V ha permitido observar gran variedad de frecuencias predominantes que van desde 1.0 a 20 Hz, sugiriendo que el suelo sobre el cual se asienta la ciudad de Chimbote es relativamente heterogéneo. El hecho de identificar la presencia de dos a tres picos de frecuencias, se corrobora lo indicado, es decir, se tiene un suelo cuya respuesta dinámica es muy compleja. Para el análisis de la información se ha definido dos rangos de frecuencia, **F₀** ($F < 3.0$ Hz) y **F₁** ($F > 3.0$ Hz).

Las frecuencias **F₀** se distribuyen de manera casi homogénea en toda la zona de estudio; sin embargo, en los extremos Norte y Sur de la ciudad sobresalen las frecuencias de 2.0 a 3.0 Hz y en la zona céntrica de la ciudad, valores de 1.0 a 2.0 Hz. Las frecuencias **F₁**, están presentes de manera uniforme en los extremos Norte y este de la ciudad, aunque los valores mayores están presentes en la Plaza de Armas y en el Vivero Forestal.

Los resultados obtenidos para la ciudad de Chimbote caracterizan a suelos dinámicamente inestables. Las frecuencias **F₀** corresponden a una capa de suelos de gran espesor que controla la dinámica local de los suelos. La capa más superficial evidenciada por **F₁**, está presente en algunas áreas y entre ellas la que fue afectada por el sismo de 1970 con procesos de licuación de suelos en las cercanías del Hotel Chimú.

El **mapa de distribución de periodos**, muestra la presencia de dos zonas con suelos dinámicamente similares. Los periodos mayores a 0.3 segundos se encuentran en un 70% del área total de la ciudad y sugieren la presencia de una capa relativamente uniforme y de gran espesor que domina el comportamiento dinámico de los suelos. Los periodos menores e iguales a 0.3 segundos, se encuentran distribuidos en tres áreas pequeñas: la primera en el extremo Este y SE de la ciudad, la segunda entre la Plaza de Armas y el Vivero Forestal, y la tercera en el extremo norte de la ciudad. 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.

Los estudios con arreglos sísmicos lineales han permitido identificar en la ciudad de Chimbote, la presencia de suelos formados por dos capas. La primera con espesores de 4 metros y velocidades V_s de hasta 130 m/s, y la segunda con espesores de 12 a 18 metros y velocidades V_s de 160 a 200 m/s. Ambas capas presentan suelos muy blandos. La superficie de contacto con el estrato más profundo alcanza velocidades V_s mayores a 520 m/s, correspondiendo a suelos muy duros o rocas blandas.

Los estudios de Tomografía Eléctrica han permitido identificar en la ciudad de Chimbote suelos con resistividades bajas a muy bajas. Asimismo, permitieron identificar la presencia de un horizonte superficial de 4 metros de espesor y de muy baja resistividad debido a la presencia e suelos arenosos, arcillosos, poco compactados y con alto nivel freático. Subyace esta capa, un suelo de relativa mayor resistividad debido a las variaciones de permeabilidad y porosidad de los materiales que conforman el substrato. Los perfiles próximos a la línea de costa muestran la presencia de suelos menos resistivos asociados a suelos con contenido de agua proveniente del mar.

Zonificación Sísmica-Geotécnica (Comportamiento Dinámico del Suelo)

La correlación entre los resultados obtenidos con cada metodología utilizada en este estudio, han permitido identificar en la ciudad de Chimbote, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de 3 zonas

sísmicas - geotécnicas, las mismas que corresponden a suelos de Tipo S2, S3 y S4. Esta clasificación permite proponer, en este estudio, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del suelo) para la ciudad de Chimbote.

RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales regionales de la ciudad de Chimbote para una mejor Gestión del Riesgo ante la ocurrencia de sismos, tsunamis y efectos secundarios. Del mismo modo, para aportar con las normativas necesarias para el desarrollo y expansión urbana de la ciudad de Chimbote.

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.
- 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.
- Dorbath, L., Cisternas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- 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).
- 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
- 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.
- 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
- 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.030 (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 Peru 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.
- 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