

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

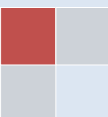
### **Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico**



### **ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA DE LA CIUDAD DE BARRANCA Provincia de Barranca – Departamento de Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo)**

**Responsable: Hernando Tavera**

**Lima – Perú  
2014**



**ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA  
DE LA CIUDAD DE BARRANCA  
Provincia de Barranca – Departamento de Lima**

**(Comportamiento Dinámico del Suelo)**

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

Ejecución del Proyecto: <sup>1</sup>Isabel Bernal  
<sup>2</sup>Juan Carlos Gomez  
<sup>1</sup>Hernando Tavera

Análisis e Interpretación: <sup>1</sup>Eliana Vizcarra  
<sup>1</sup>Fabiola Rosado  
<sup>2</sup>Mariana Vivanco

Software SIG: <sup>1</sup>Rider Navarro  
<sup>2</sup>Mariana Vivanco

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

Sismología: Patricia Guardia  
Cristóbal Condori

Simulación Tsunamis: Julio Martínez

Instrumentación Sísmica: David Portugal

<sup>1</sup>Sísmica y Geofísica

<sup>2</sup>Geología y Geotecnia

## 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 Barranca, Provincia de Barranca, Departamento de Lima. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Asimismo, se propone los posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de inundaciones por crecidas del río Pativilca y por tsunamis.*

*Los resultados obtenidos para la Ciudad de Barranca han permitido identificar, según el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de tres (3) zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.*

*El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Barranca 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.- Depósitos del Cuaternario

##### 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

## ANEXOS - CD

ANEXO 1: Zonas Susceptibles a Inundación

ANEXO 2: Análisis de Calicatas y Exploración Manual

ANEXO 3: 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:

- *Ciudad de 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](http://www.acerosarequipa.com)):

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

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

c.) **Buenos materiales.** Solo la calidad de los materiales que se utilizan en la construcción permitirá tener la seguridad de que las estructuras 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 Barranca ubicada en el distrito de Barranca, provincia de Barranca, departamento de Lima (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 Barranca

### **3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO: Ciudad de Barranca**

Los orígenes de la ciudad de Barranca se remontan a la época preincaica, siendo conocida como “Guamammayo” que significa “Gavilan del río”, ya en 1547 fue conocido como “Valle de Guamánque” que significa “Río del Halcon”. Los conquistadores lo rebautizaron con el nombre de San Ildenfonso de Barranca, por la asistencia de numerosos barcos a las riberas del río Pativilca. Durante la colonia se le conocía con el nombre de “Kananka”. La palabra Barranca tiene su origen en una variación de este vocablo, perteneciente al idioma Yunca que se hablaba en la zona, al idioma español.

El Municipio de Barranca fue creado en el año 1823 y años más tarde, durante el primer gobierno de Augusto B. Leguía se eleva a categoría de villa el pueblo de Barranca, capital del distrito, mediante la Ley No. 1130. Hasta el año 1984 formaba parte de la provincia de Chancay, pero a partir del 5 de octubre del mismo año, es parte de la Provincia de Barranca.

En la actualidad, Barranca es una ciudad portuaria del centro noroccidental del Perú, capital de la Provincia de Barranca del Departamento de Lima ubicada a 175 km al norte de Lima, capital de Perú, a orillas del río Pativilca (Figura 2). Cuenta con aproximadamente 65 mil habitantes. La ciudad de Barranca tiene una superficie de 153.76 km<sup>2</sup> y una población de 133,904 habitantes según datos del INEI (2007). Limita por el norte con las provincias Bolognesi y Huarmey (Departamento Ancash), por el sur con la provincia Huaura (Departamento Lima), por el este con la provincia Ocos (Departamento Ancash) y por el oeste con el Océano Pacífico.

#### **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.



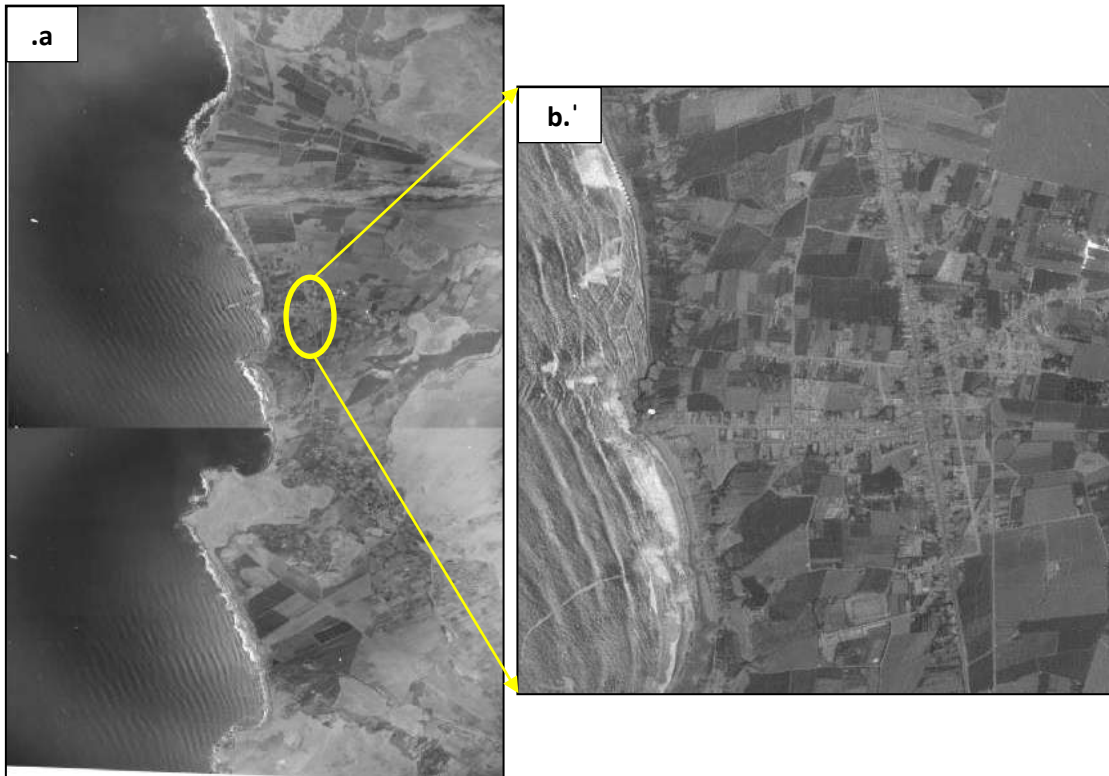


Figura 3: a) Área regional de la ciudad de Barranca en el año 1962, .b) La ciudad de Barranca y terrenos utilizados en actividades agrícolas

Para la ciudad de Barranca, el análisis multitemporal, se realizó en base a fotografías aéreas del año 1962 (Instituto Geográfico Nacional), mapa catastral de la ciudad del año 2000 (Municipalidad de Barranca) e imágenes del servidor Digital Globe.

En la Figura 3a, se muestra el área regional de estudio y demarcado con línea amarilla la zona urbana de la ciudad de Barranca en el año 1962 y en la Figura 3b, el zoom muestra que el área urbana es menor en relación a los terrenos usados para las labores agrícolas. Según el INEI, el Censo de 1961 indicó que la población urbana fue de 17,520 personas y rural del orden de 3,079 habitantes.

En la Figura 4 se muestra, en comparación, el área urbana de Barranca correspondiente al año 1961 (.a) y al año 2013 (.b), obsérvese que actualmente se ocupa terrenos agrícolas pertenecientes a la llanura aluvial. Según el Censo del 2007 (INEI), la ciudad de Barranca tiene una población de 61,178 habitantes y de ellos, 53,964 viven en la zona urbana (89%) y 7,214 en la zona rural (11%).

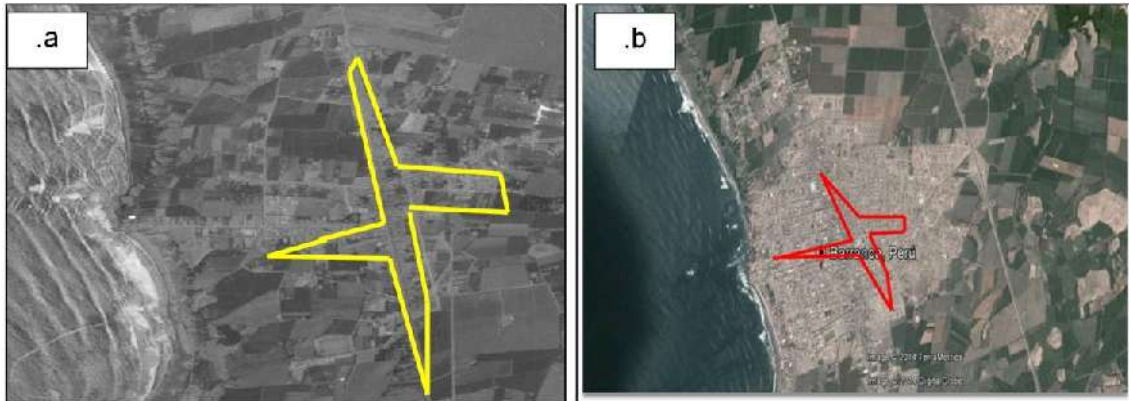


Figura 4: .a) Zona urbana de Barranca en el año 1961. .b). Zona urbana de Barranca del año 2013.

Actualmente, la zona urbana de la ciudad de Barranca se está extendiendo hacia su extremo Este (Figura 5), ocupando zonas de colinas que en el año 1961 no presentaban población: Urbanizaciones Los Arenales, El Molino, Víctor Raúl Haya de la Torre. De acuerdo a este escenario, es probable que la zona de expansión urbana en los próximos 50 años se desarrolle hacia el extremo Sureste de la ciudad; es decir, en áreas actualmente dedicadas a las actividades agrícolas.

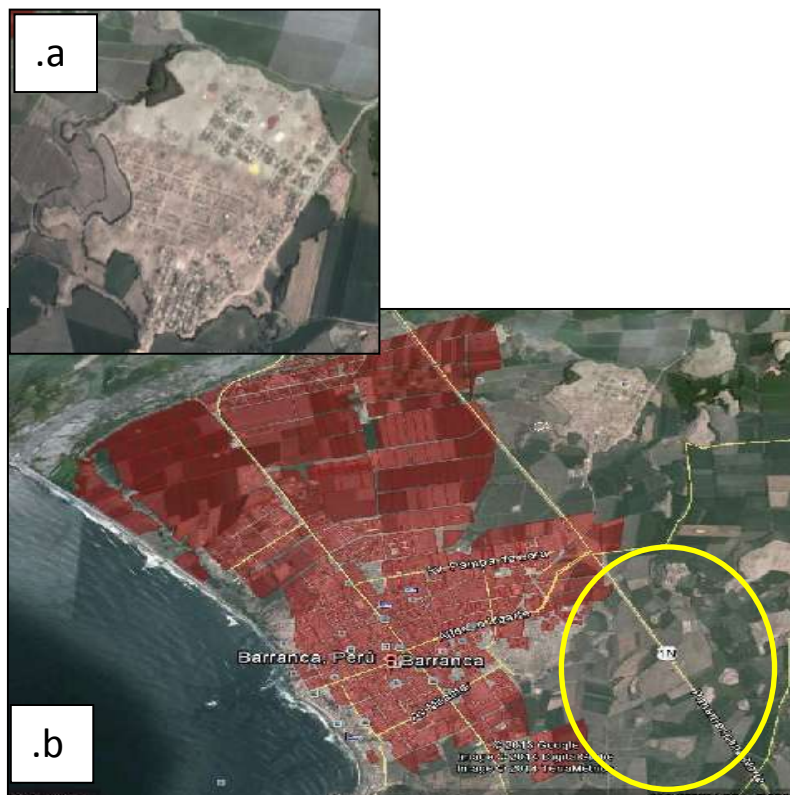


Figura 5: .a) En la ciudad de Barranca, zona de colina parcialmente urbanizada: Víctor Raúl Haya de la Torre y Los Arenales. .b) Mapa catastral de la ciudad de Barranca – 2010, sobre imagen de Google Earth (área de color rojo). El círculo amarillo indica la zona de probable desarrollo urbano

#### 4.- ANTECEDENTES

La historia sísmica del Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y que de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales (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 por 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 áreas 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 áreas.

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.

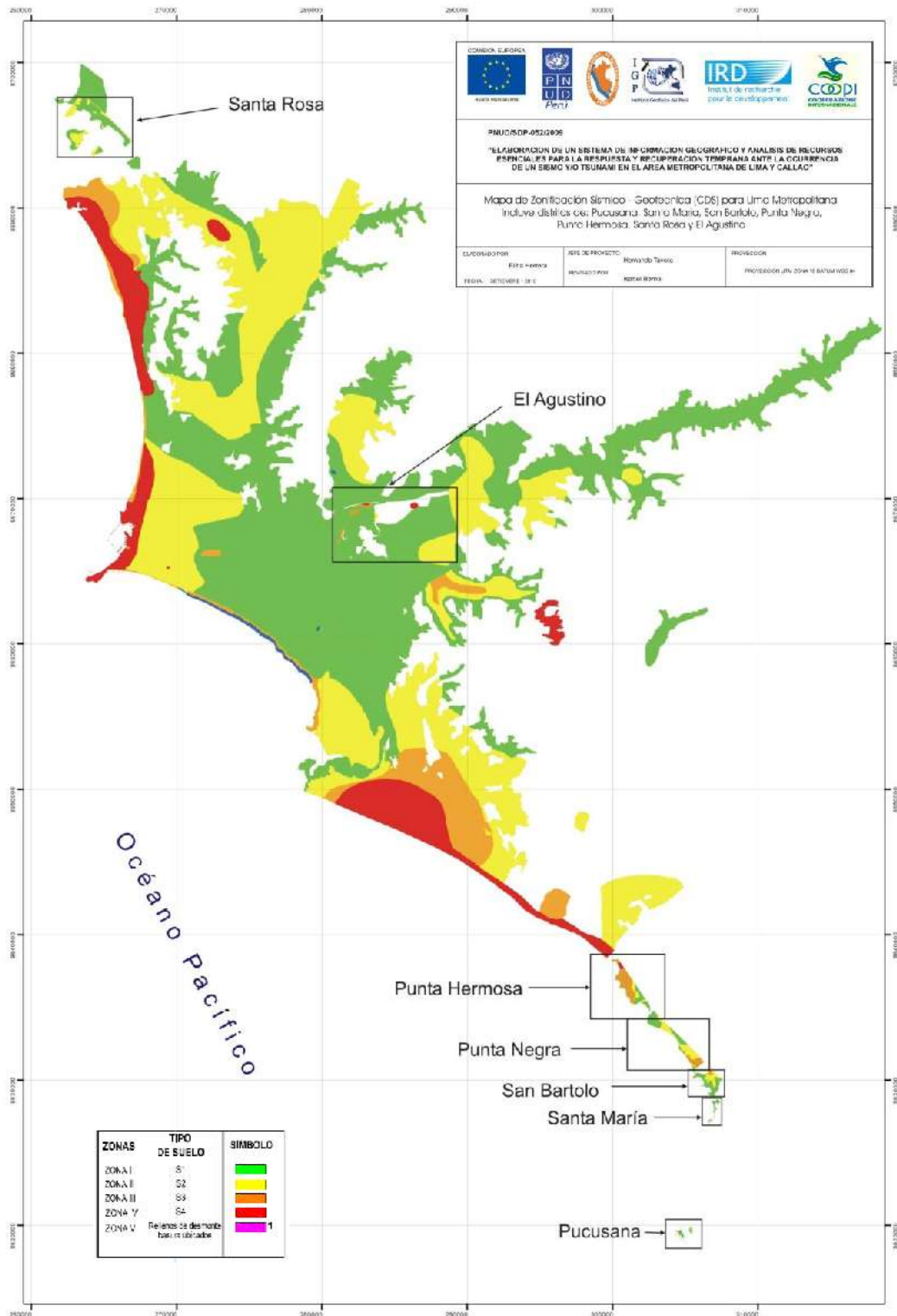


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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 Barranca son presentados en este informe bajo el siguiente título: “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la Ciudad de Barranca”.**

## 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 la zona andina y subandina, próximos a las áreas 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  $\lambda$ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, para zonas firmes de la ciudad de México el valor de  $\lambda$  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 Barranca 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., 2013), las ecuaciones de atenuación definidas 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, Huarmey, Barranca y Huacho. En la ciudad de Barranca, se ha instalado una estación Acelerométrica en el local del Complejo Deportivo Municipal (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 interior del Complejo Deportivo Municipal, ciudad de Barranca

### 7.3.- Estudios de Tsunamis

Se determina, 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 Barranca (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 las zonas de playa de Barranca 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: riberas del río Pativilca

.- **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 Pativilca.

.- **Técnica de Análisis Geotécnico:** Se establece la construcción de 10 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 mismos haciendo uso del Código SUCS (Clasificación Unificada de Suelos) para el total de las muestras.

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, en ambos caso 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 un equipo sísmico compuesto por un registrador tipo CitySharp y sensores tipo Lennartz de tres componentes de registro (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 BRC-202 presenta bajos niveles de ruido; mientras que, la señal en BRC-041, ubicado próximo a la carretera 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 este 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.

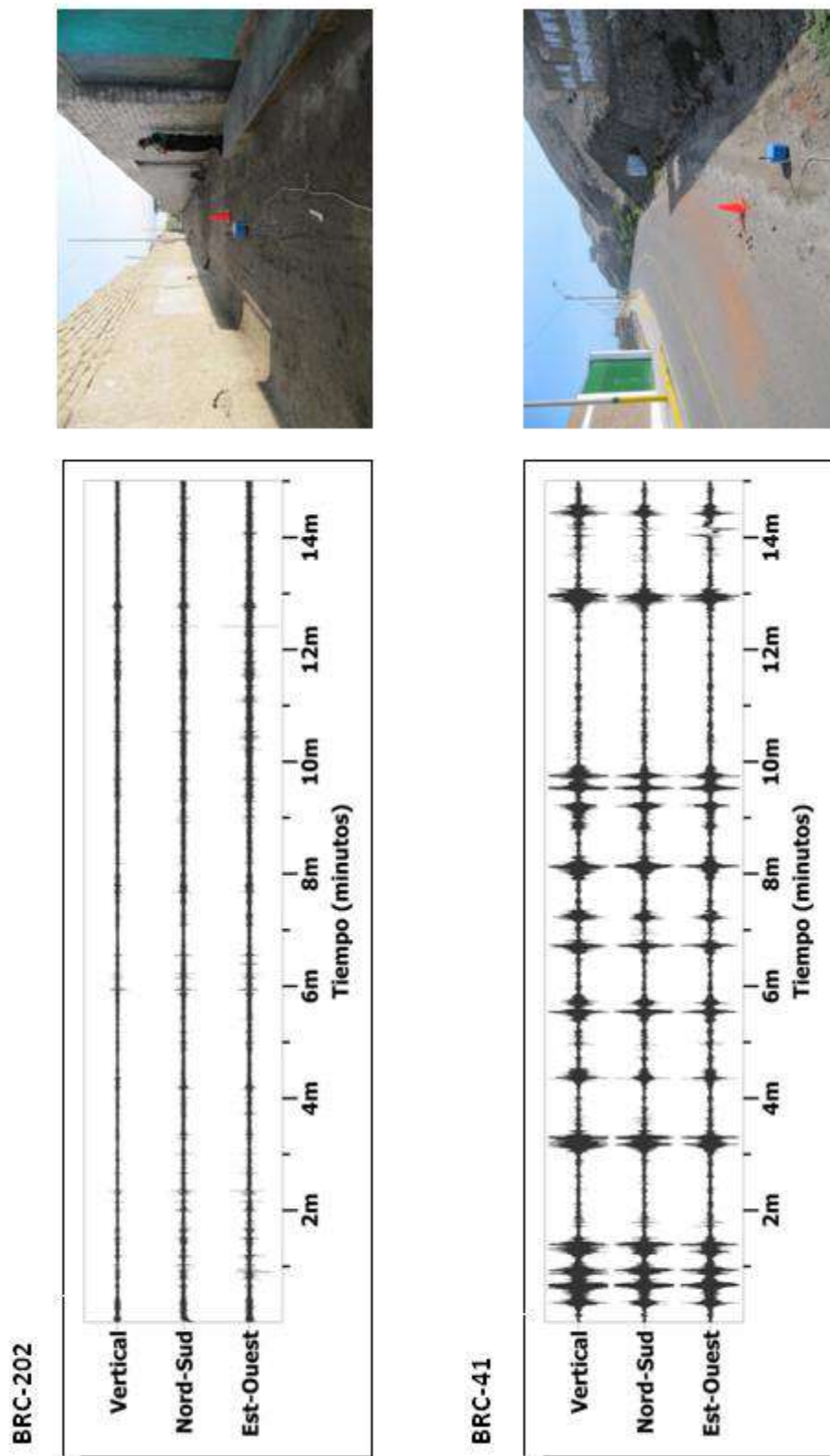


Figura 10: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona libre de ruidos de fondo (BRC-202) y otro con ruido aleatorio (BRC-41). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada 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.

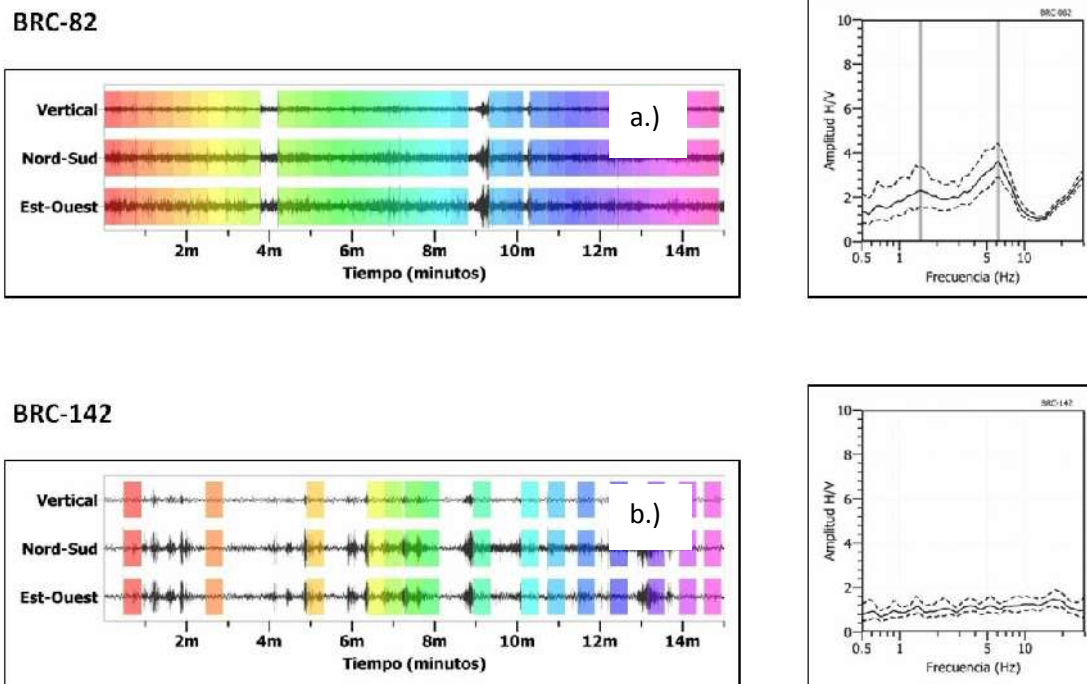


Figura 11: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) en sus tres componentes y con sus respectivos gráficos de razones espectrales H/V. **a)** Registros y razones H/V donde se identifican frecuencias predominantes, **b)** Registros en los cuales no resalta ninguna frecuencia predominante. 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 para el registro de datos

.- **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 bajo un punto en forma 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 sólo 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 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 (rojo): Comprende valores mayores a 1500 ohm.m. Se considera dentro de este grupo a rocas Ígneas y metamórficas, y dentro de las sedimentarias, a los conglomerados. Un factor importante a señalar es que estos materiales estarán bajo condiciones de ausencia de agua. Asimismo, el grado de alteración que pudiera originar la presencia de arcillas permitiría un descenso de sus valores.*

*.- Alto Resistivo (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 (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 (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 (azul): Comprende valores menores a 20 ohm.m. Estos valores están referidos principalmente a la presencia de agua, material orgánico, arcillas. Se debe considerar que el grado de salinidad del agua afecta los valores de resistividad, permitiendo que estos alcancen valores del orden del 0.2 Ohm.m., equivalente al agua de mar.*

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

## **8.- ASPECTOS SISMOLÓGICOS Y TSUNAMI**

La ciudad de Barranca 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. Del mismo, 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 Barranca y según información contenida en el catálogo sísmico del Perú, fueron los sismos de 1940 (8.0Mw), 1966 (7.5Mw), 1970 (7.7Mw), 1974 (7.5Mw) y 1996 (7.7Mw) 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 Barranca fue de VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Otros sismos importantes produjeron en la ciudad de Barranca intensidades entre V y VII (MM), con daños y efectos puntuales en la ciudad, sobre todo 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 escasa población allí existente.

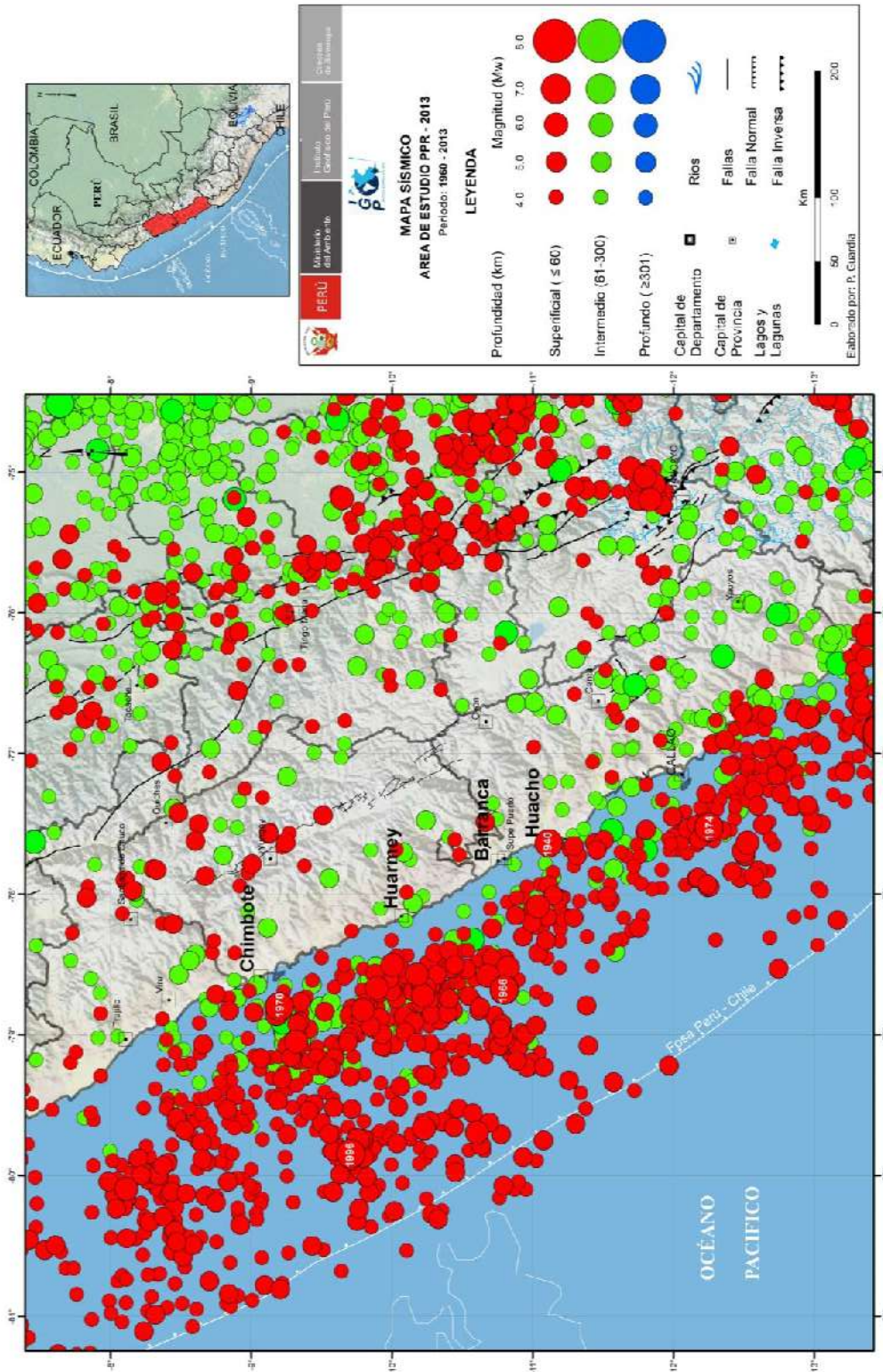


Figura 14: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región centro del Perú. Los sismos de mayor magnitud están indicados por el año de ocurrencia dentro de los círculos mayores.

Es importante hacer notar que en a las fechas en que ocurrieron los sismos y tsunamis, la situación geográfica y demográfica de la ciudad de Barranca fue variando en el tiempo, siendo recientemente su crecimiento acelerado sobre áreas no pobladas en las cercanías del río y zonas de playa, lo cual ha incrementado su riesgo ante la posible recurrencia de estos peligros.

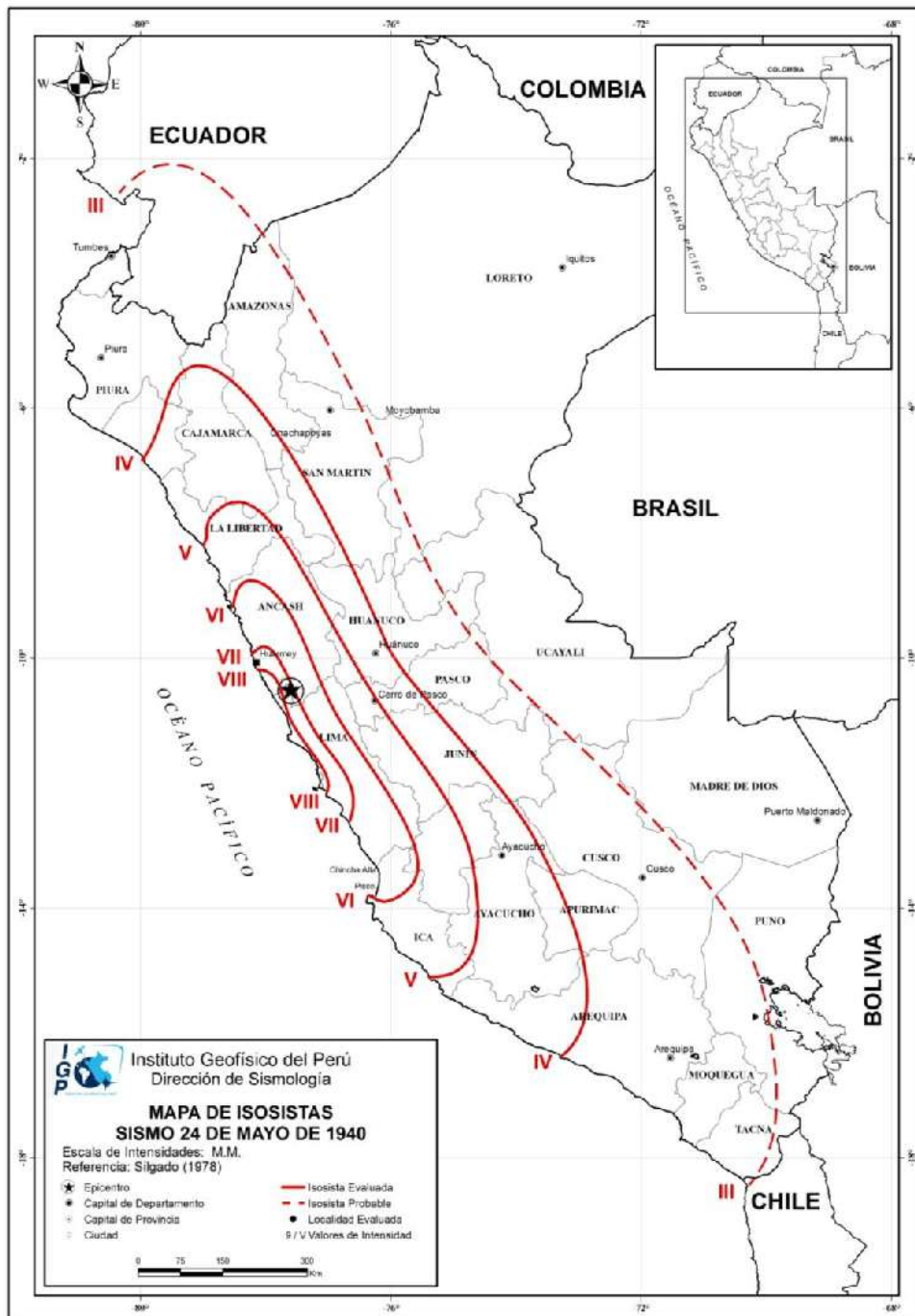


Figura 15: Mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de mayo de 1940 (8.0Mw). En la ciudad de Barranca las intensidades fueron el orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada.

## 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 380 a 400 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 Barranca.

## 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 7.0Mw 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 edificaciones aledañas a la zona costera. El tsunami de 1974, con olas del orden de 3 a 4 metros, inundó varias fábricas 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 Barranca, debido probablemente a no existencia de obras y/o poca población en sus cercanías para los años en que estos peligros se hicieron presentes.

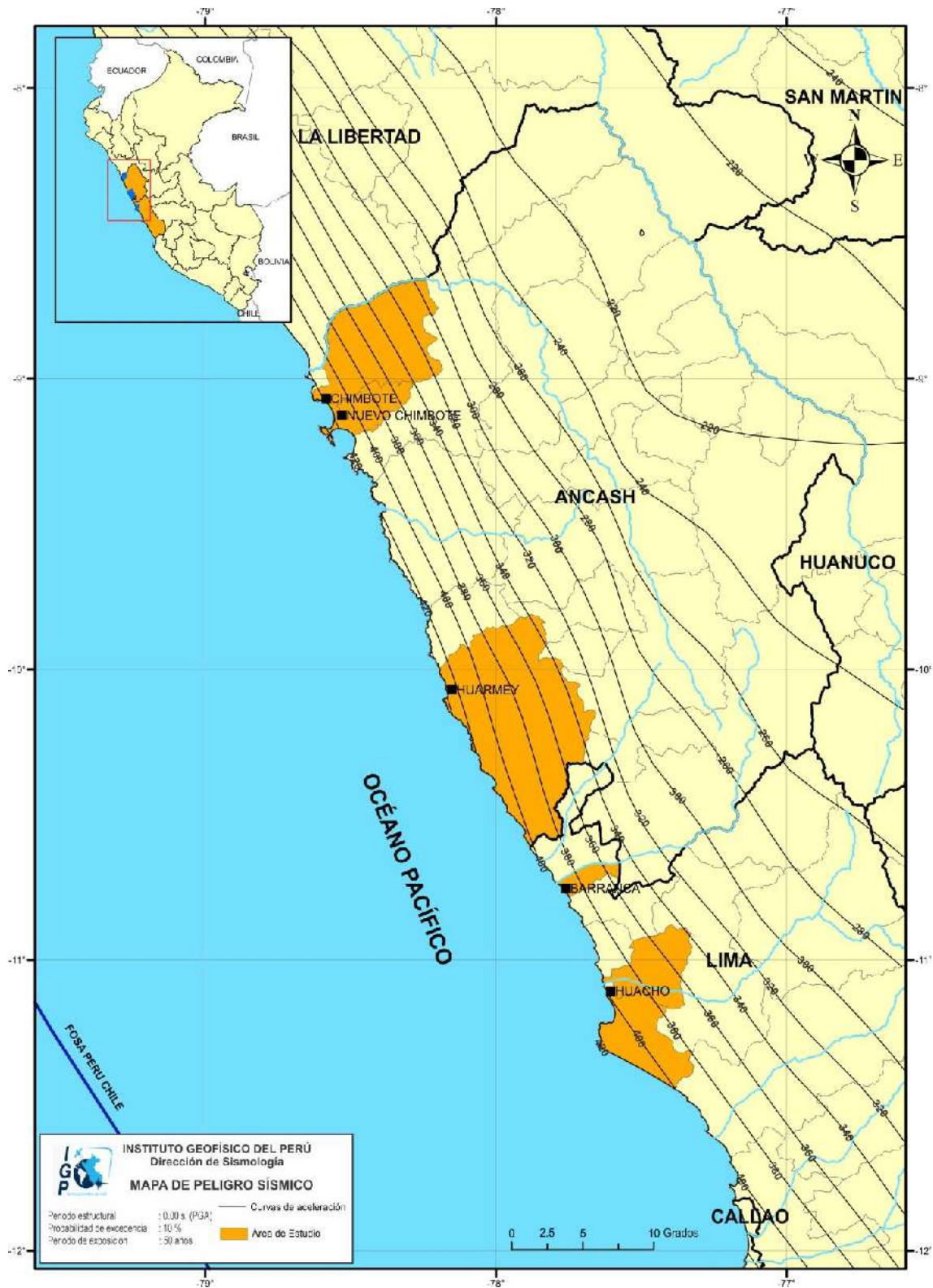


Figura 16: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

Tabla 1: Parámetros epicentrales de los principales sismos tsunamigénicos que han afectado la costa de la región central del Perú

| 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 Barranca, se considera la metodología de modelamiento numérico haciendo uso de la siguiente información:

*.- Datos topográficos y batimétricos: Los datos de batimetría local provienen de la carta 2144 adquirida en la Dirección de Hidrografía de la Marina de Guerra del Perú (DHN), siendo su muestreo de 30 metros. La topografía local fue construida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) Aster GDEM 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 Barranca 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 se hará uso del algoritmo TUNAMI-N2 (Goto y Ogawa, 1992),*

*el mismo que fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Tohoku en Japón. 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 y vertical.*

En la Figura 17 se muestra los resultados obtenidos para la zona costera de la ciudad de Barranca y ellos indican que la primera ola del tsunami llegaría en un tiempo entre 18 a 20 minutos después de ocurrido el sismo. Esta ola tendría alturas de 6 metros en la zona de la Bahía de Barranca, 5 metros en la playa Malva Rosa y de 4 metros en las playas de El Colorado, Bandurria y Atarraya; además de la boca del río Pativilca (Figura 16).

Por otro lado, en la Figura 18 se presenta el mapa de niveles de inundación horizontal, tierra adentro con respecto a la línea de costa, y en ella se observa que el tsunami alcanzaría distancias de 1,500 metros a lo largo del río Pativilca, 400 metros a la altura de las playas Malva Rosa, Bandurria y Atarraya, y de 200 metros a la altura de la playa El Colorado y en la Bahía de Barranca.

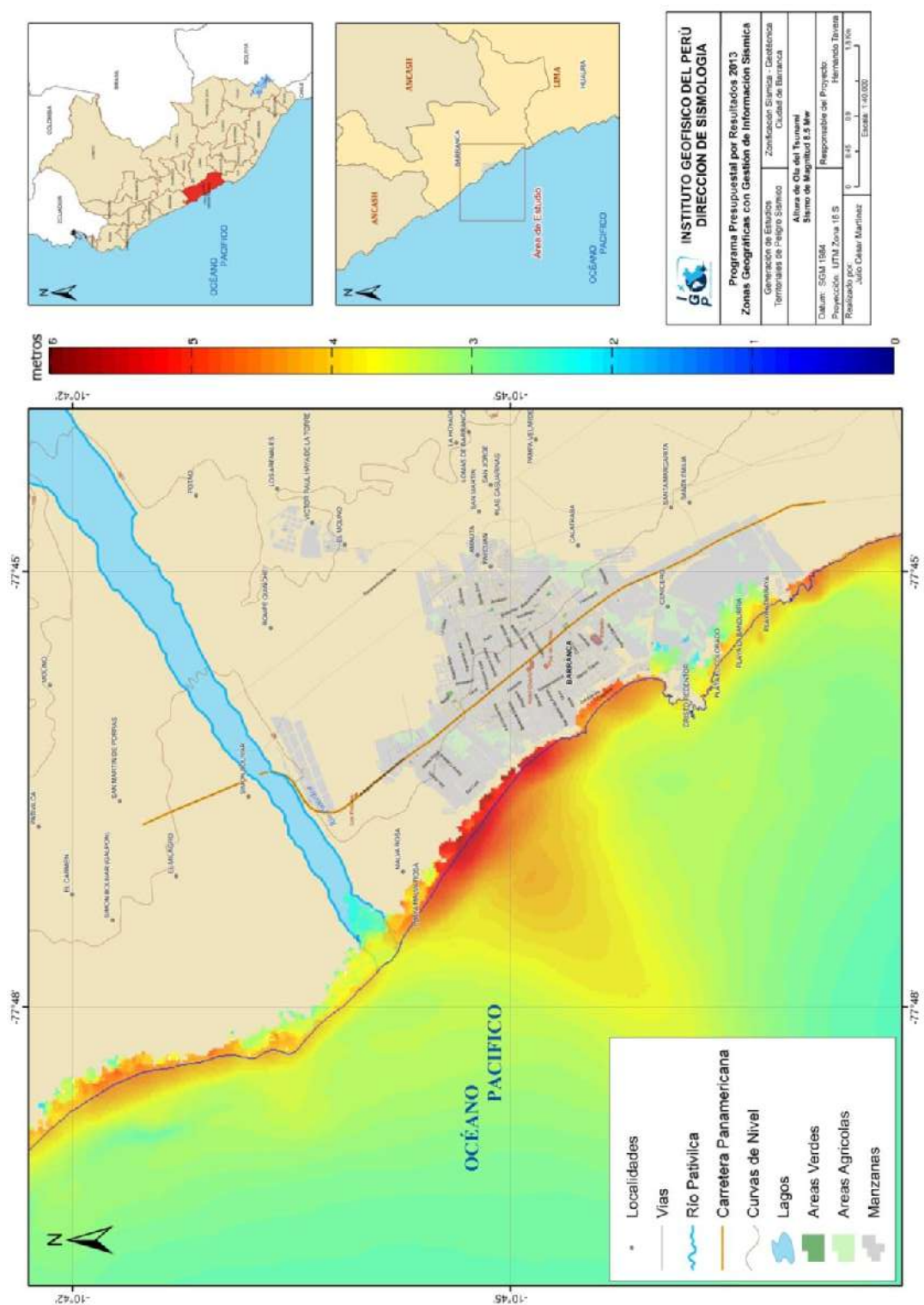


Figura 17: Mapa de altura de ola de tsunami en la zona costera de la ciudad de Barranca

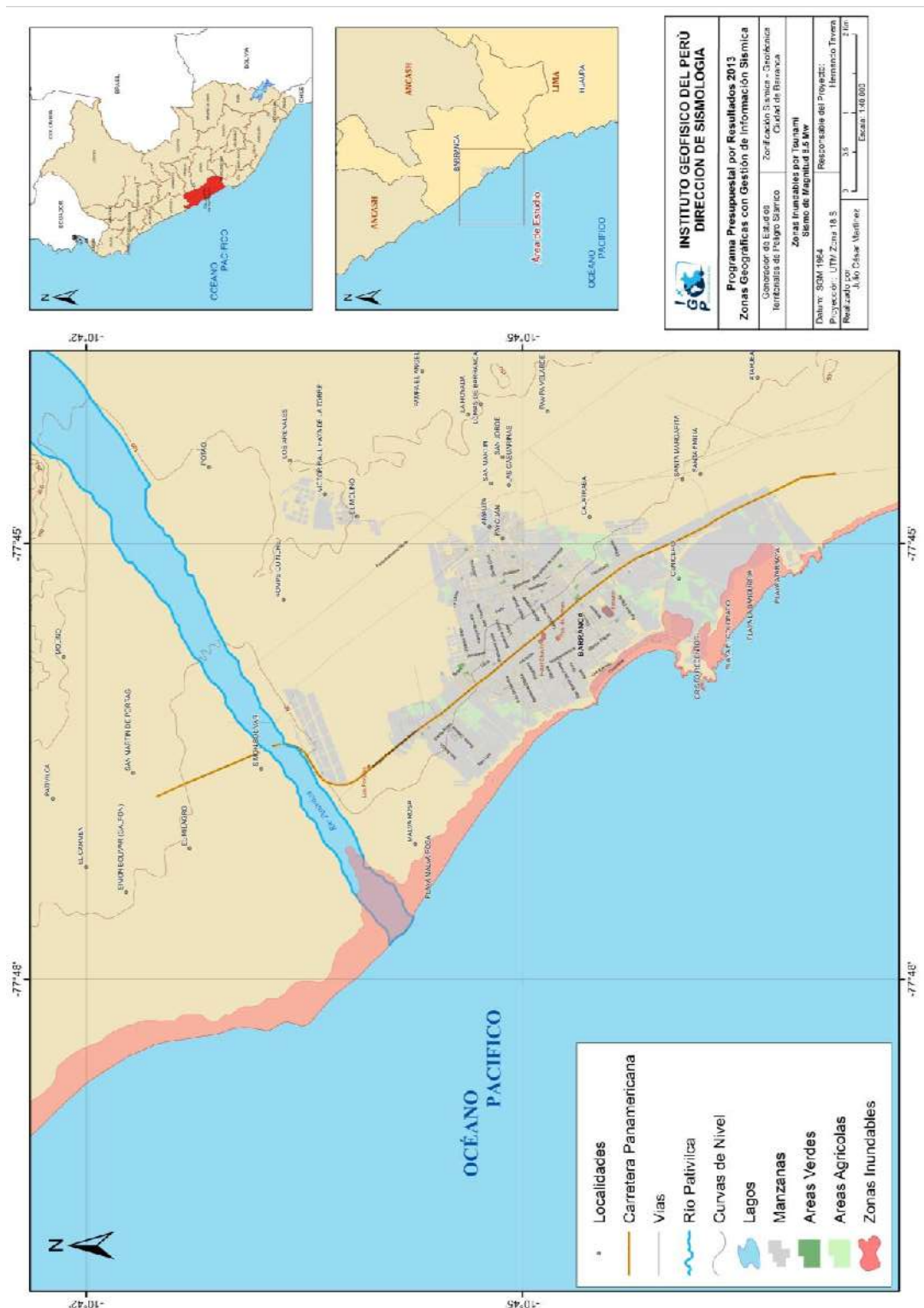


Figura 18: Mapa de niveles de inundación horizontal en la zona costera de la ciudad de Barranca debido a la ocurrencia de un tsunami

## **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](http://www.astergdem.com)). Esta información ha sido georeferenciada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) considerando el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y datum WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial, 1984), 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, la ciudad de Barranca se asienta sobre una llanura aluvial con una cota promedio de 25 m.s.n.m. (Figura 19). En los alrededores del área, hacia su extremo este, se observa la presencia de montañas que sobrepasan los 100 m.s.n.m.

#### **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 Barranca se encuentra asentada sobre una llanura cuyas pendientes presentan inclinaciones del orden de 5° en promedio (Figura 20).

#### **9.1.2. Unidades Geomorfológicas**

El distrito y ciudad de Barranca se encuentra emplazado sobre una llanura aluvial del río Pativilca, siendo posible reconocer las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 21):

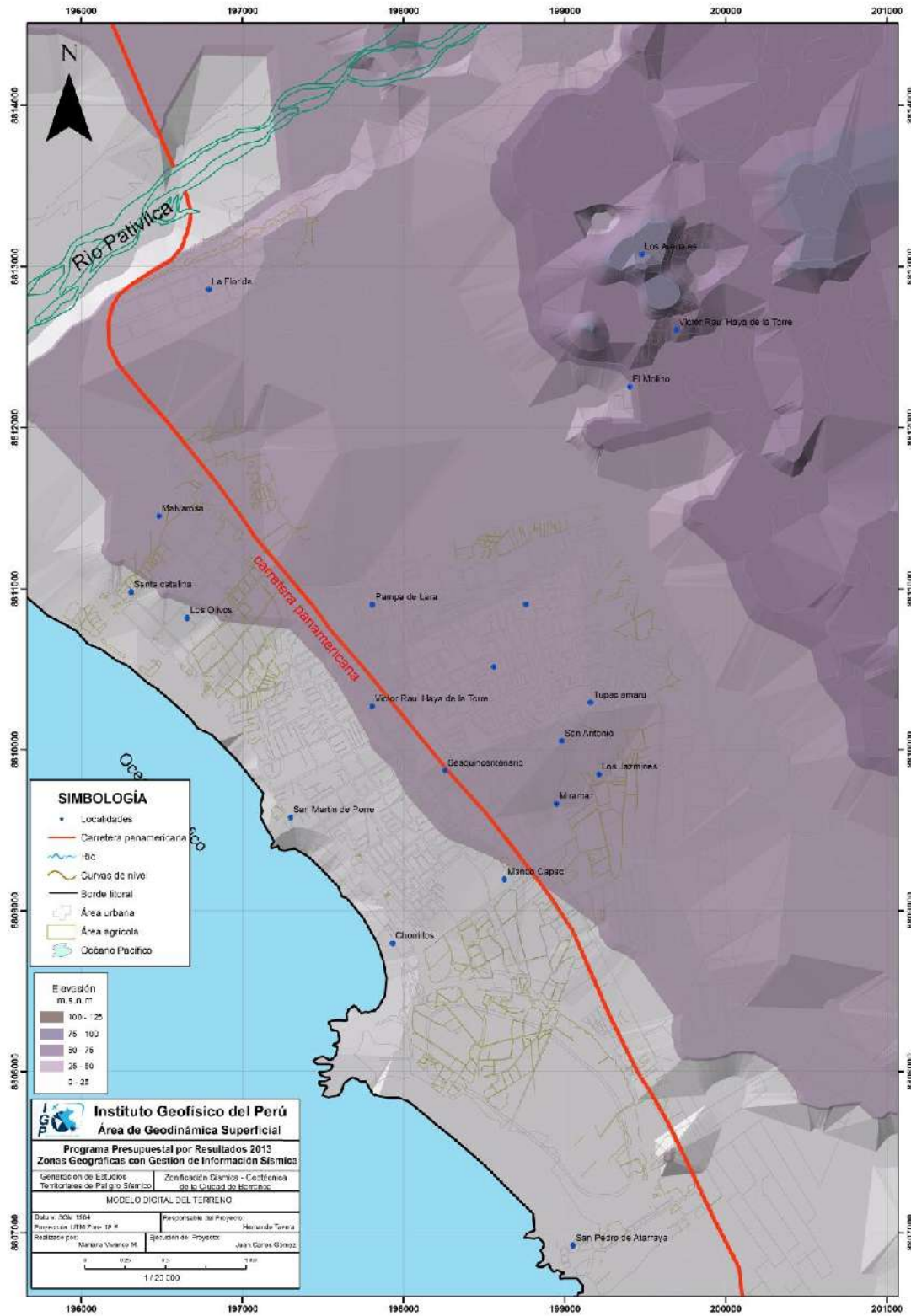


Figura 19: Mapa de modelo digital del terreno de la ciudad de Barranca

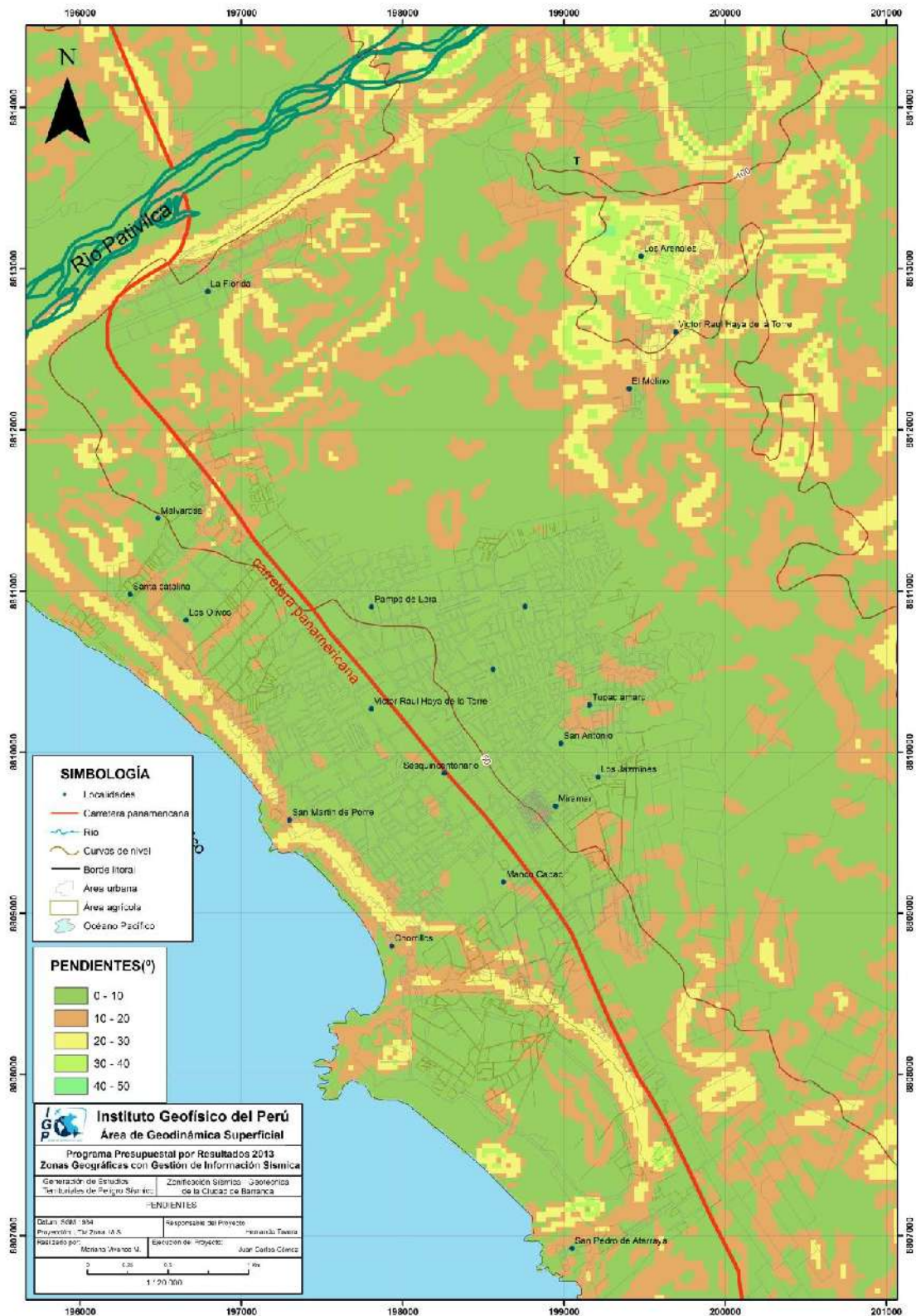


Figura 20: Mapa de pendientes de la ciudad de barranca

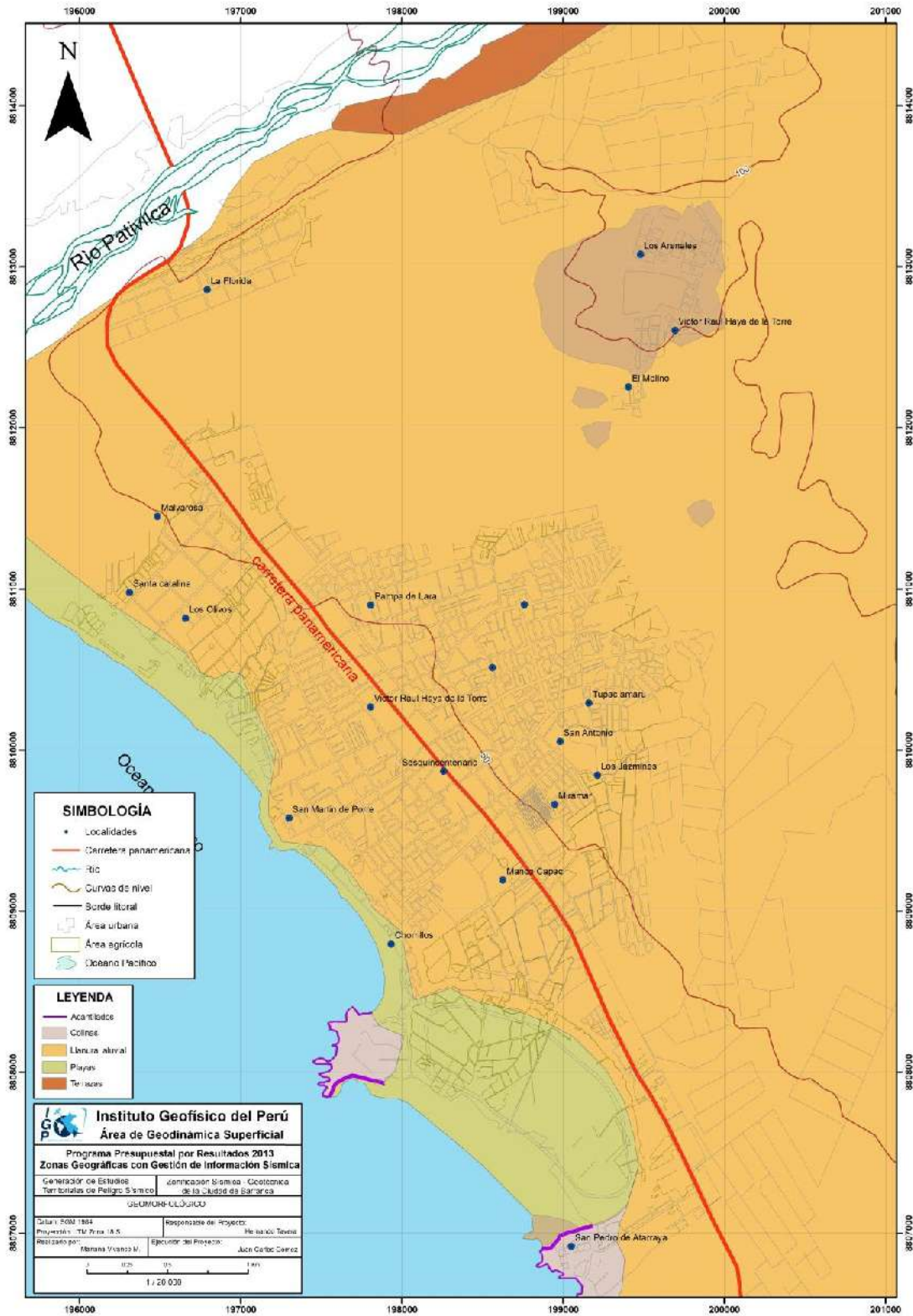


Figura 21. Mapa geomorfológico de la ciudad de Barranca

.- **Llanura Aluvial:** Esta unidad es representada por un relieve plano compuesto por materiales que han sido acarreados y depositados por el río Pativilca. Sobre estos depósitos se encuentra el casco urbano y los terrenos agrícolas (Figura 22).



Figura 22: Vista de la ciudad de Barranca y zonas agrícolas desde el cerro El Molino

.- **Colinas:** A esta unidad pertenecen las colinas y cerros de poca elevación que bordean a la ciudad, siendo ondulados y poco agrestes con pendientes que varían entre  $20^\circ$  a  $30^\circ$  y elevaciones de 50 a 200 m.s.n.m. Esta unidad está generalmente cubierta por capas de arena eólica y material coluvial, siendo el substrato de naturaleza volcánica. La unidad es modelada por agentes erosivos (intemperismo y meteorización), siendo el viento y la erosión marina los más recurrentes. En el borde litoral están presentes los cerros Chorrillos, Colorado y Atarraya, este último ha sido aprovechado como área urbana; mientras que, el Cerro Colorado por su ubicación geográfica divide a las playas Chorrillos, Miraflores y puerto Chico de las playas Colorado, Bandurria y Atarraya.(Figura 23).

Hacia el extremo Sureste de la ciudad se encuentran los cerros conocidos como Buena Vista y Molino, ambos con altitudes de 100 m aproximadamente y cubiertos por material tipo coluvial. La forma del relieve de estos cerros es controlado por la actividad eólica y antrópica como el emplazamiento de viviendas (Figura 24).



Figura 23: Vista del Cerro Colorado y población aledaña



Figura 24. Vista del Cerro Buena Vista invadido por viviendas de material noble

Al extremo Noreste de la ciudad, los cerros presentan alturas del orden de 180 m, sobre un relieve ondulado y cubierto por material coluvial, todos con pendientes que varían entre  $15^\circ$  a  $30^\circ$ . Estos cerros son constantemente modelados por la acción eólica y la actividad antrópica. En general, los cerros están ocupados por los A.H. Víctor Raúl, Arenales, La Ensenada y Potao (Figura 25).



Figura 25: Vista de los cerros La Ensenada y Víctor Raúl ocupados parcialmente por viviendas de material precario

.- **Acantilados:** Estas unidades presentan laderas abruptas y son parte de una zona de transición entre el continente y el mar. Las rocas que las constituyen están sometidas a diferentes procesos de erosión mecánica y meteorización física y química. La erosión por parte del mar se realiza por acción hidráulica (desgaste causado por la dinámica marina: oleaje), abrasión y disolución (Figura 26).

En la ciudad de Barranca, los acantilados son reconocidos en los cerros Colorado, Atrarraya y Chorrillos, todos con pendiente subvertical y alturas promedio de 50 metros. En esta zona también se identificó la presencia de un arco marino y una plataforma de abrasión.



Figura 26: Vista acantilados y arco marino en el cerro Colorado

.- **Terrazas:** Estas unidades son parte de las llanuras de inundación que están por encima del nivel máximo de las aguas de un río y son el resultado de la incisión de ellos mismos. La unidad se encuentra presente en el extremo norte de la ciudad y consiste en una superficie plana conformada por depósitos fluviales de 2 metros de altura y una longitud aproximada de 7.84 km. Su relieve es modificado por la erosión fluvial del río Pativilca, la inundación y la actividad antrópica (Figura 27).



Figura 27: Terraza fluvial en el margen izquierdo del río Pativilca utilizada para la actividad agrícola

.- **Playa:** Las playas son acumulaciones de arena, grava o mezcla de ambas, situadas en el límite entre el mar y el continente, siendo el resultado de una dinámica en la cual interviene fundamentalmente el oleaje. La unidad está constituida por sedimentos cuyo origen es muy variado: fluvial, erosión de los acantilados, sedimentos de fondo marino, eólico, a los que se le incluyen los resultantes por actividades antrópicas.

En la zona costera de la ciudad de Barranca, se tiene a las playas Chorrillos, Miraflores y Puerto Chico, todas ubicadas a distancias, desde la Plaza de Armas, del orden de 800 a 1200 metros. En dirección Sur se encuentran las playas Colorado y Bandurria, limitando con el cerro Atrarraya. Estas dos playas se encuentran separadas de las anteriores por el cerro Colorado y se encuentran a una distancia aproximada de 2000 metros de la Plaza de Armas de la ciudad (Figura 28).



Figura 28: Circuito de playas en la ciudad de Barranca

## 9.2.- Geología

Como información de base se consideró el Cuadrángulo Geológico de Barranca editado por INGEMMET a escala 1/100,000 (Boletín N°26, Hoja: 22-h). En general, se observa que el área de estudio se emplaza sobre afloramientos de la Formación Casma, constituida por derrames andesíticos de grano fino perteneciente al

Cretáceo Inferior. En la secuencia estratigráfica le siguen depósitos del Cuaternario como Aluviales del pleistoceno (Qp-al2), constituidos por gravas angulosas en una matriz areno limosa (Tabla 2). Asimismo, afloran depósitos coluvio-aluviales constituidos por gravas angulosas, arenas y limos. Continuando con la serie del Pleistoceno se tienen los depósitos eólicos (Qp-e) conformados por arenas de grano medio a fino.

También se puede encontrar afloramientos del Cuaternario Reciente, entre ellos, depósitos aluviales (Qr-al) con mezcla de gravas, arenas, limos y arcillas, seguida de depósitos fluviales (Qr-fl) presentes en el cauce del río Pativilca. En el borde costero de la ciudad de Barranca se aprecian depósitos marinos (Qr-m) compuestos principalmente de arenas redondeadas. Finalmente, están presentes los depósitos antropogénicos (Qr-d) generados por la acción del hombre como escombros y basurales (Figura 29).

Tabla 2: Cronoestratigrafía y lito-estratigrafía de la zona en donde se encuentra la ciudad de Barranca

| CRONOESTRATIGRAFIA |             |             | LITOESTRATIGRAFIA         |                |
|--------------------|-------------|-------------|---------------------------|----------------|
| ERATEMA            | SISTEMA     | SERIE       | UNIDAD                    | LITOLOGIA      |
|                    |             |             | ESTRATIGRAFICA            |                |
| CENOZOICO          | CUATERNARIO | RECIENTE    | Depósitos Antropogénicos  | <b>Qr-d</b>    |
|                    |             |             | Depósitos Marinos         | <b>Qr-m</b>    |
|                    |             |             | Depósitos Fluvial         | <b>Qr-fl</b>   |
|                    |             |             | Depósitos Aluvial         | <b>Qr-al</b>   |
|                    |             | PLEISTOCENO | Depósitos Eólicos         | <b>Qp-e</b>    |
|                    |             |             | Depósitos Coluvio-Aluvial | <b>Qp-coal</b> |
|                    |             |             | Depósitos Aluviales 2     | <b>Qp-al2</b>  |
| MESOZOICO          | CRETACEO    | SUPERIOR    | Fomación Casma            | <b>Km-c</b>    |

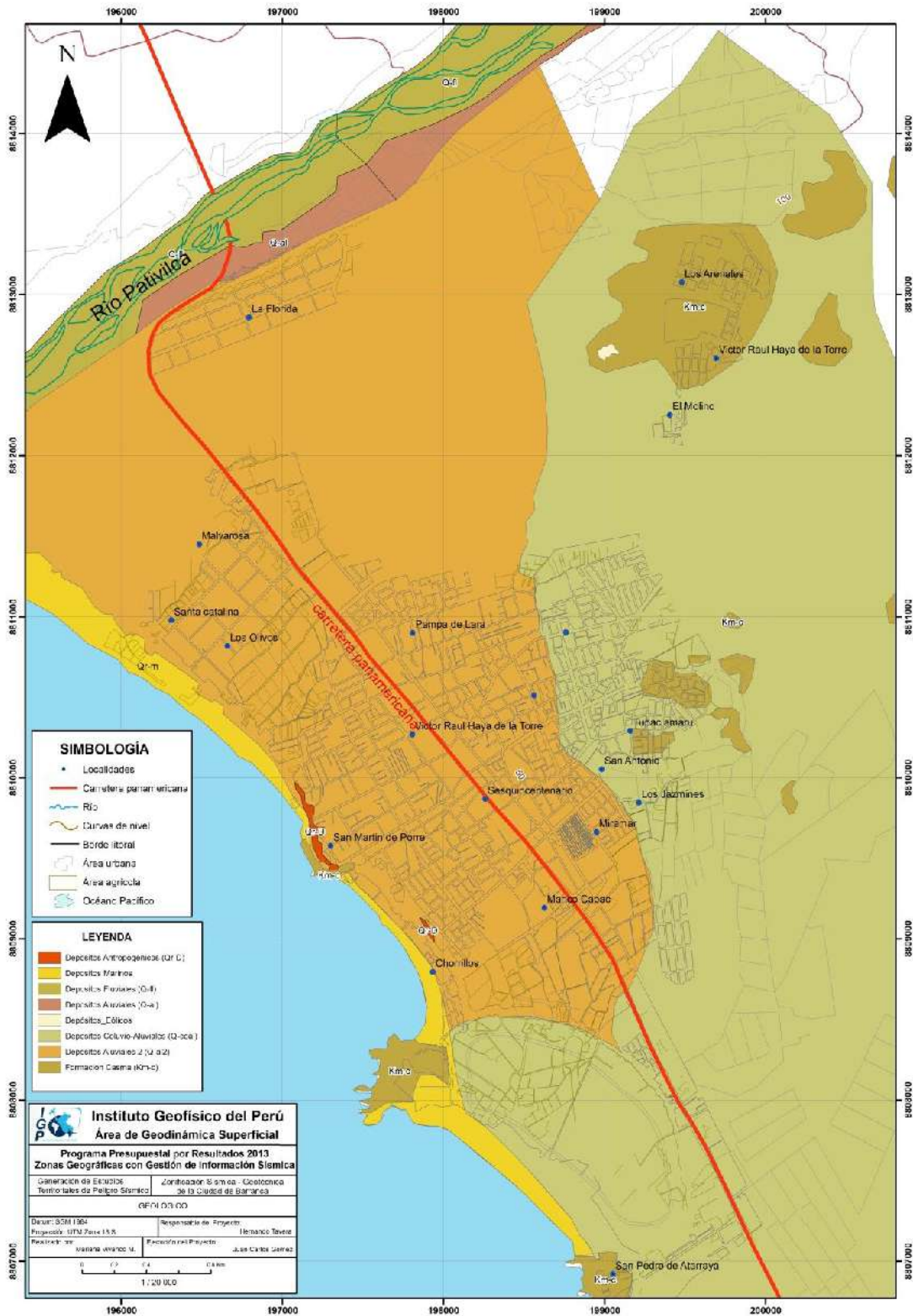


Figura 29: Mapa geológico de la ciudad de Barranca

### 9.2.1.- Rocas Volcánicas

Las rocas volcánicas son parte de la Formación Casma y afloran en el cerro Colorado ubicado en el extremo Suroeste de la ciudad de Barranca (Figura 30). Estas rocas corresponden a una serie de volcánicos pseudo estratificados, conformados por derrames delgados de andesitas masivas de grano fino intercaladas con grauvacas de color grisáceo de grano medio ligeramente oxidado. En algunas secuencias se puede evidenciar la presencia de capas calcáreas en la parte inferior del cerro Colorado y en la playa Chorrillos ubicada al Oeste del de la ciudad de Barranca, además del A.H. Pucúan ubicado al Noreste de la ciudad de estudio. En el extremo NE de la ciudad afloran derrames de andesitas masivas, de grano fino bien estratificado, con areniscas cuarzosas blancas a rojizas interestratificada con limo arcillitas rojas.



Figura 30: Playa Puerto Chico colindante con el cerro Colorado en donde se observa afloramientos de la formación Casma

### 9.2.2.- Depósitos Cuaternarios

.- **Depósitos Aluviales (Qp-al 2):** Se encuentran en la margen izquierda del río Pativilca y sobre ellos se asienta el 60% de la población de Barranca. Están conformados por acumulaciones de bloques y gravas angulosas a redondeadas, de origen ígneo, distribuidas en matriz de arenas, limo y arcilla. Esta unidad se encuentra formando diferentes niveles de terrazas y conos de deyección de color parduzco, con espesores variables que van de 1 a 25 metros, seguida de una secuencia de arcillas limosas con espesor variable desde 0.15 a 1.20 m, sobre la cual se encuentran

asentadas las zonas de cultivo y centros poblados (Figura 31).



*Figura 31: Ejemplo de depósitos aluviales conformados por gravas que afloran en Barranca*

**- Depósitos Coluvio-Aluviales (Qr-coal):** Depósitos formados por la acción conjunta del agua y la gravedad. Ambos transportan sedimentos a distancias cortas y que se acumulan en la parte baja de las laderas y en las superficies de pendiente baja. Consisten de clastos angulosos, con matriz de arena y limo, tienen una incipiente estratificación entre los materiales, Figura 32.



*Figura 32: Los A.H. San Valentín y Manuel Bustamante ubicados al extremo Noreste de la ciudad de Barranca se encuentran asentados sobre depósitos coluviales*

**.- Depósitos Eólicos (Qr-e):** Se encuentran presentes en el extremo Este de la ciudad de Barranca y están constituidos por arenas de grano fino a medio y se presentan como mantos de arena de grosor variable o como pequeños barjanes (dunas solitarias en forma de media luna) en movimiento con dirección predominante Noreste. Los depósitos eólicos están presentes en las inmediaciones de los cerros Barranquito (Pampa Velarde), Pampa Chiu Chiu en el Poblado de Santa Elena y también en el sector los Arenales (Figura 33).



*Figura 33: Depósitos eólicos que se encuentran cubriendo las laderas del cerro Barranquito ubicado en el extremo Noreste de la ciudad de Barranca*

**.- Depósitos Aluviales (Qr-al):** Se han formado por acción de los ríos que drenan a la vertiente occidental andina para erosionar rocas antiguas. El río Pativilca acumula los materiales en la parte baja de su vertiente distribuyendo los materiales finos (arcilla y limo) y gruesos (grava y arena). Estas acumulaciones están presentes en la margen izquierda del río Pativilca, al extremo Noreste de la ciudad de Barranca, desde el puente Bolívar hasta aguas arriba. Están constituidos por capas de grava gruesa a fina, bien clasificados: arenas, arcillas y limos (Figura 34).

**.- Depósitos Fluviales (Qr-fl):** Depósitos que se encuentran ubicados en el extremo Noreste de la ciudad de Barranca, en las inmediaciones del río Pativilca. Están compuestos por gravas de origen ígneo, volcánico y sedimentario, de diferentes tamaños y envueltos en una matriz arenosa, con una distribución irregular (Figura 35).



Figura 34: Margen izquierda del río Pativilca, en el centro poblado Florida Alta, afloramientos de gravas (guijarros y cantos) con pequeños lentes de arenas de grano fino.



Figura 35: Río Pativilca, dirección del cauce del Noreste al Suroeste. En todo su caudal se emplazan gravas de diferente tamaño

**- Depósitos Marinos (Qr-m):** Se encuentran emplazados en el extremo Oeste de la ciudad de Barranca, a lo largo del litoral y están conformando las principales playas de la provincia. Se trata de depósitos constituidos por materiales predominantemente arenosos, transportados y acumulados por corrientes marinas y por materiales que resultan de la destrucción del acantilado por acción erosiva del mar (Figura 36).



Figura 36: Playas en las cuales se observa acumulaciones de arenas sueltas de grano medio a fino, todos depositados por la dinámica marina

.- **Depósitos Antropogénicos (Qr-D):** Corresponden a depósitos generados por el hombre y en general, están conformados por desmonte y restos de escombros de viviendas, así como por material de corte y relleno. Estos depósitos se encuentran repartidos, mayormente en la parte superior de los acantilados en el tramo Playa Chocoy - Cerro Chorrillos y en forma dispersa, en la parte del Balneario Chorrillos y Puerto Chico. Asimismo, estos depósitos antropogénicos se encuentran rellenando depresiones producto de la erosión del suelo, lo cual modifica la forma y relieve del terreno original, hasta llegar a conformar terraplenes que son utilizados para habilitaciones urbanas (Figura 37).



Figura 37: Depósitos antropogénicos generados por el hombre de manera informal sobre las terrazas ubicadas en el extremo Oeste de la ciudad de Barranca, inmediaciones del camal municipal.

### 9.3.- Geodinámica

La geodinámica aborda todos los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra 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). Asimismo, estudia los eventos de origen hidrometeorológico que generan cambios en la morfología del terreno (por ejemplo, inundaciones).

#### 9.3.1.- Movimientos en Masa

En la ciudad de Barranca se ha observado la ocurrencia de eventos de geodinámica externa como caída de rocas y derrumbes, además de fenómenos naturales como erosión marina, inundaciones fluviales y por mal drenaje (antrópicos) y elevación del nivel freático (Figura 38). En la ciudad de Barranca se distinguen los siguientes tipos de movimientos en masa:

.- **Caída de rocas:** Cuando uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurran desplazamientos cortantes apreciables, se dice que se ha producido una caída de rocas o suelo, según sea el material involucrado. Estos escenarios han sido observados en el extremo sur de la ciudad de Barranca, en el cerro Colorado debido a que presenta laderas con pendientes altas hasta ser casi verticales, lo cual favorece al desprendimiento de rocas (Figura 39).

.- **Derrumbes:** Corresponden a caídas repentinas de rocas o suelos por pérdida de la resistencia al esfuerzo cortante, no presentan planos o superficies de deslizamiento. Se muestran a lo largo del sector de acantilados que delimitan a las playas del Norte y Sur (playa Atrarraya) de la ciudad de Barranca, esto debido a la alta pendiente que presentan dichas áreas. Los materiales que involucran son conglomerados no consolidados, conformados por gravas redondeadas y limos que constituyen la matriz de estos depósitos (Figura 40). Estos eventos también están presentes en el extremo Norte de la ciudad de Barranca y en el A.H. Las Palmeras de Bolívar, el cual se encuentra en la margen izquierda del río Pativilca, sobre depósitos fluviales conformados por gravas redondeadas (Figura 41).

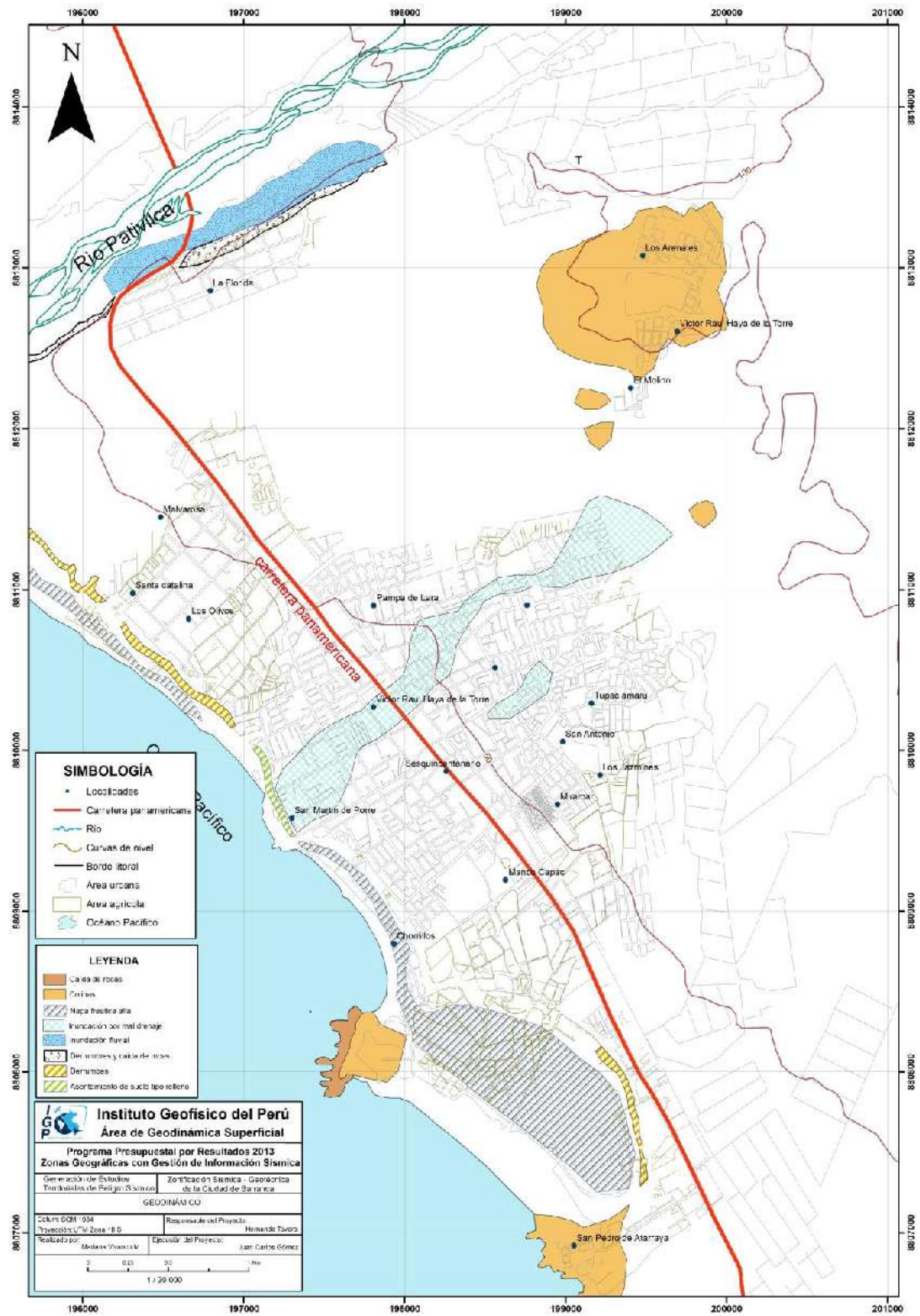


Figura 38: Mapa geodinámico para la ciudad de Barranca



Figura 39: Ladera norte del cerro Colorado con presencia de pendientes altas que favorecen a la caída de rocas



Figura 40: Acantilados con longitudes de hasta 2.6 km en el extremo sur de la ciudad de Barranca, entre la playa Bandurria hasta playa Colorado. La ocurrencia de derrumbes es debido a la fuerte pendiente del terreno



Figura 41: Derrumbre ubicado en el A.H. Las Palmas de Bolívar. La intervención antrópica agrava la estabilidad del talud conformado por gravas redondeadas. Mapa geodinámico para la ciudad de Barranca

### 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 Barranca, predomina la erosión marina por su proximidad al litoral.

.- **Erosión marina:** La erosión marina es producto de la dinámica marina, capaz de romper, fracturar y arrastrar bloques de gran tamaño causando luego el desgaste de los fragmentos y a la vez el retroceso de los acantilados. La magnitud de estos efectos erosivos depende de la naturaleza y dureza de las rocas que conforman las zonas costeras, además de la posición de sus estratos respecto a la superficie del mar. Estos procesos son permanentes, ocurren a lo largo de la línea costera de la ciudad de Barranca; es decir, las playas Atrarraya, Bandurria, Colorado, Puerto Chico, Miraflores y Chorrillos (Figura 42).



Figura 42: Vista hacia el Sur de las playas Chorrillos, Miraflores y Puerto Chico. En este sector, al subir la marea sobrepasa e inunda la alameda (Av. Chorrillos) afectando la vía y el malecón

### 9.3.3.- Inundación Fluvial

Las inundaciones son consideradas como peligros hidrometeorológicos y consisten en el desborde de un río de su cauce natural debido principalmente a precipitaciones extraordinarias y colmatación del cauce. Estos eventos pueden ser repentinos y/o violentos y traen como consecuencia la destrucción de viviendas, terrenos de cultivo o en algunos casos pérdidas de vida.

El río Pativilca nace en las alturas del nevado Cajat (4000 m.s.n.m), ubicado entre los departamentos de Ancash y Lima, recorre las provincias de Recuay y Bolognesi en el Departamento de Ancash, y Cajatambo y Barranca en el departamento de Lima para drenar a la vertiente del Océano Pacífico. Es uno de los ríos de mayor aporte hídrico a la zona costera del borde occidental de la región central del Perú. La cuenca del río Pativilca tiene un área de aproximadamente 4,837 km<sup>2</sup>, siendo un río anastomosado; es decir, formado por una red de canales entrelazados, formando islillas temporales con material de arrastre – gravas (Figura 43).

**.- Zonas susceptibles a inundaciones:** En la ciudad de Barranca, el aumento de caudal afecta principalmente los sectores de la margen izquierda del río Pativilca, zona agrícola, donde se sitúa el A.H Las Palmeras de Bolívar, Figura 44.



Figura 43: El río Pativilca desarrolla canales de flujo hídrico entrelazados, forma típica de un río anastomosado



Figura 44: Río Pativilca y llanura de inundación sobre la cual se emplaza el A.H. Las Palmas de Bolívar

A fin de analizar los posibles escenarios de inundación para el río Pativilca, se han realizado 5 secciones topográficas en la parte baja del río a 6 km antes de su desembocadura en el Océano Pacífico. La ubicación de estas secciones y sus coordenadas de muestran en la Figura 45 y Tabla 3.

Tabla 3: Coordenadas UTM para las 5 secciones topográficas sobre el río Pativilca

| SECCIONES | ESTE       | NORTE       | COTA | CAUDAL(m3/seg) |
|-----------|------------|-------------|------|----------------|
| A         | 198418.000 | 8814379.000 | 71   | 8.55           |
| B         | 198109.000 | 8814251.000 | 55   | 14.84          |
| C         | 197520.000 | 8813817.000 | 50   | 15.12          |
| D         | 196655.000 | 8813289.000 | 39   | 20.64          |
| E         | 194649.000 | 8812207.000 | 12   | 32.25          |

Los caudales han sido estimados en base a la velocidad promedio del agua y al área del cauce en cada sección. El caudal mínimo es de  $8.55 \text{ m}^3/\text{s}$  y el máximo de  $32.25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos datos corresponden al mes de diciembre, periodo en el cual se inicia la temporada de lluvias en la parte alta de la cuenca.

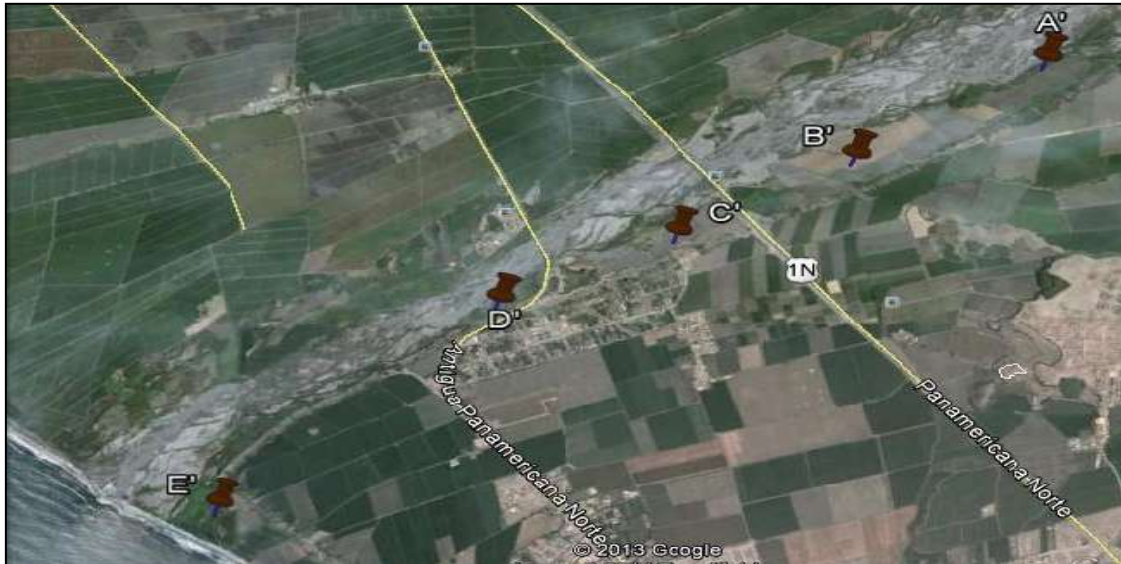
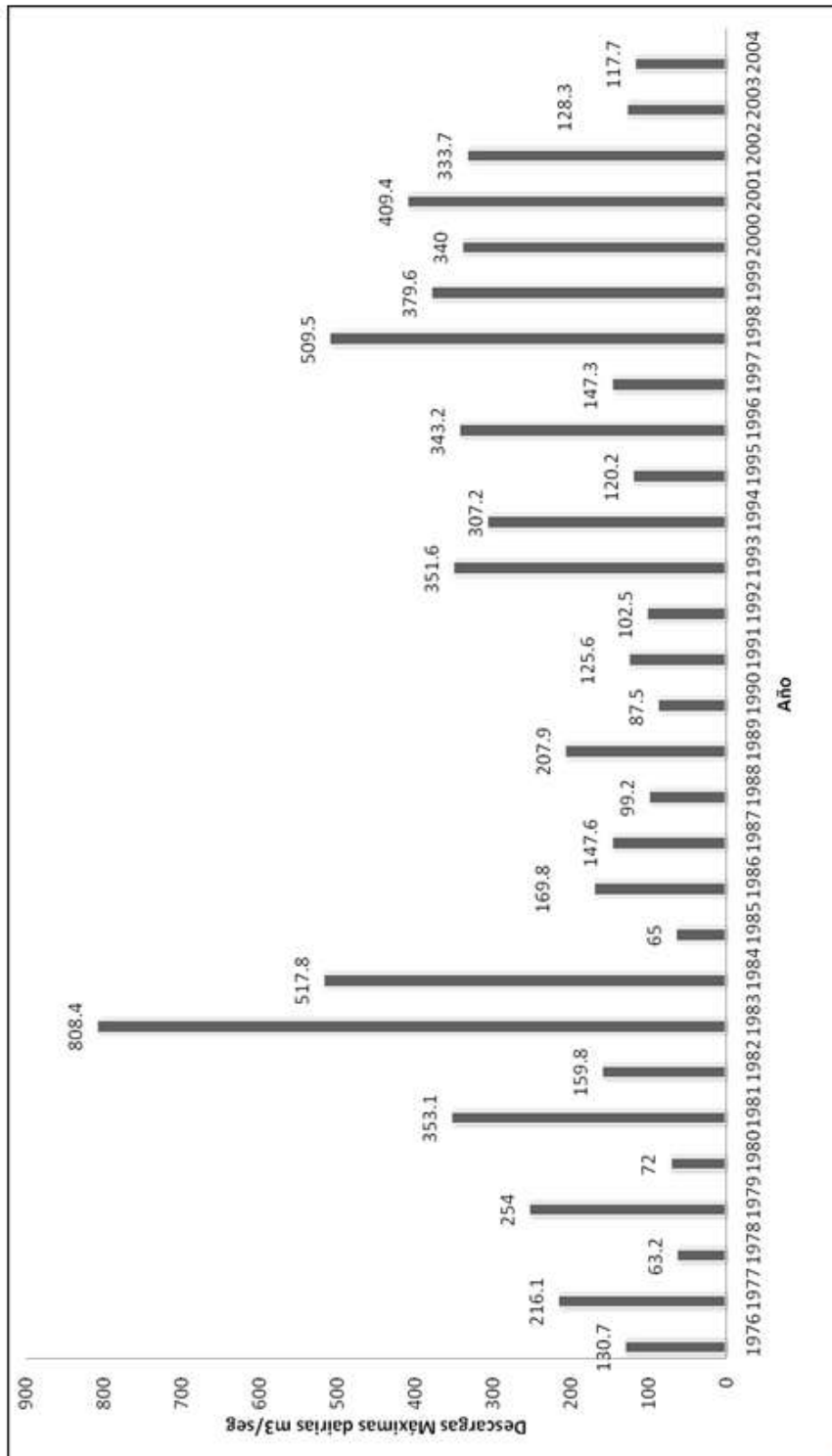


Figura 45: Distribución espacial de las 5 secciones topográficas realizadas en el río Pativilca

En general, el caudal del río Pativilca aumenta los meses de febrero y marzo, debido a las precipitaciones pluviales originadas a más de 4000 m de altura, lo que permite alcanzar caudales máximos históricos de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  de descarga máxima diaria, tal como ocurrió en el año 1983 durante el fenómeno del Niño. En este escenario se produjo la inundación de terrenos agrícolas en ambas márgenes del río, siendo el izquierdo perteneciente a la ciudad de Barranca.

Según testimonios de pobladores el flujo hídrico llegó a inundar terrenos de la parte izquierda cercana a la desembocadura que es utilizada para la agricultura, además de la zona de playa. Del mismo modo, en el año 1989 llegó a tener un caudal máximo diario de  $207.9 \text{ m}^3/\text{seg}$ , debido al mismo fenómeno. Otro caudal máximo diario registrado fue de  $509.5 \text{ m}^3/\text{seg}$  en el año 1998 que corresponde a la ocurrencia del fenómeno del Niño más severo que afectó a toda la costa Peruana. Los datos de caudales máximos diarios entre los años 1976 y 2004 corresponden a la estación Hidrométrica de Yonanpampa-Larga a cargo del SENAMHI (Tabla 4).

Tabla 4: Estadística de las descargas máximas en m<sup>3</sup>/seg correspondientes al periodo 1976-2004 (SENAMHI)



Para realizar el modelamiento de las posibles zonas de inundación en el río Pativilca, se ha utilizado el software HEC-RAS y un caudal promedio mínimo de 13.98 m<sup>3</sup>/seg y un máximo de 890 m<sup>3</sup>/seg. registrado por la estación Hidrométrica de Yonanpampa-Larga en los últimos 30 años. Debe entenderse que los resultados obtenidos en las simulaciones pueden variar con la realidad, puesto que las condiciones asumidas en el proceso no corresponden a datos exactos (Figura 46).

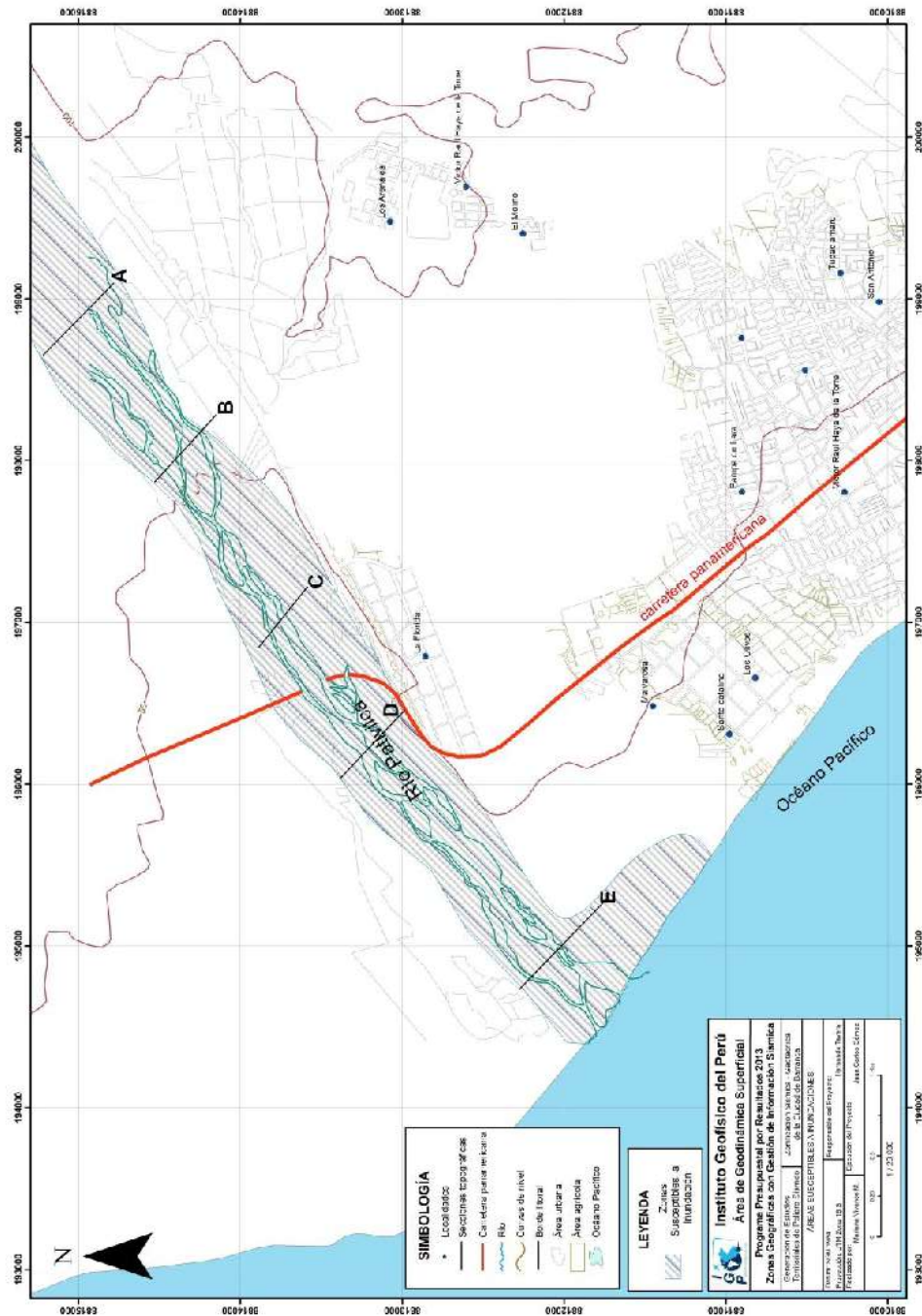


Figura 46: Simulación numérica para el peligro de inundación en la ciudad de Barranca

En base a los resultados obtenidos en la simulación, se ha identificado 3 zonas susceptibles a inundación y cuyas características son:

.- **Sección “C”**: La sección se encuentra a 500 m aguas abajo del puente de la Nueva Panamericana Norte. Para un caudal máximo de  $890 \text{ m}^3/\text{seg}$ , sería afectada la margen izquierda del río Pativilca, área sobre la cual se encuentra el A.H. Las Palmeras, además de las zonas agrícolas. En la margen derecha del río, el área agrícola está protegida con gaviones y según el plano catastral, corresponde al distrito de Pativilca (Figura 47).

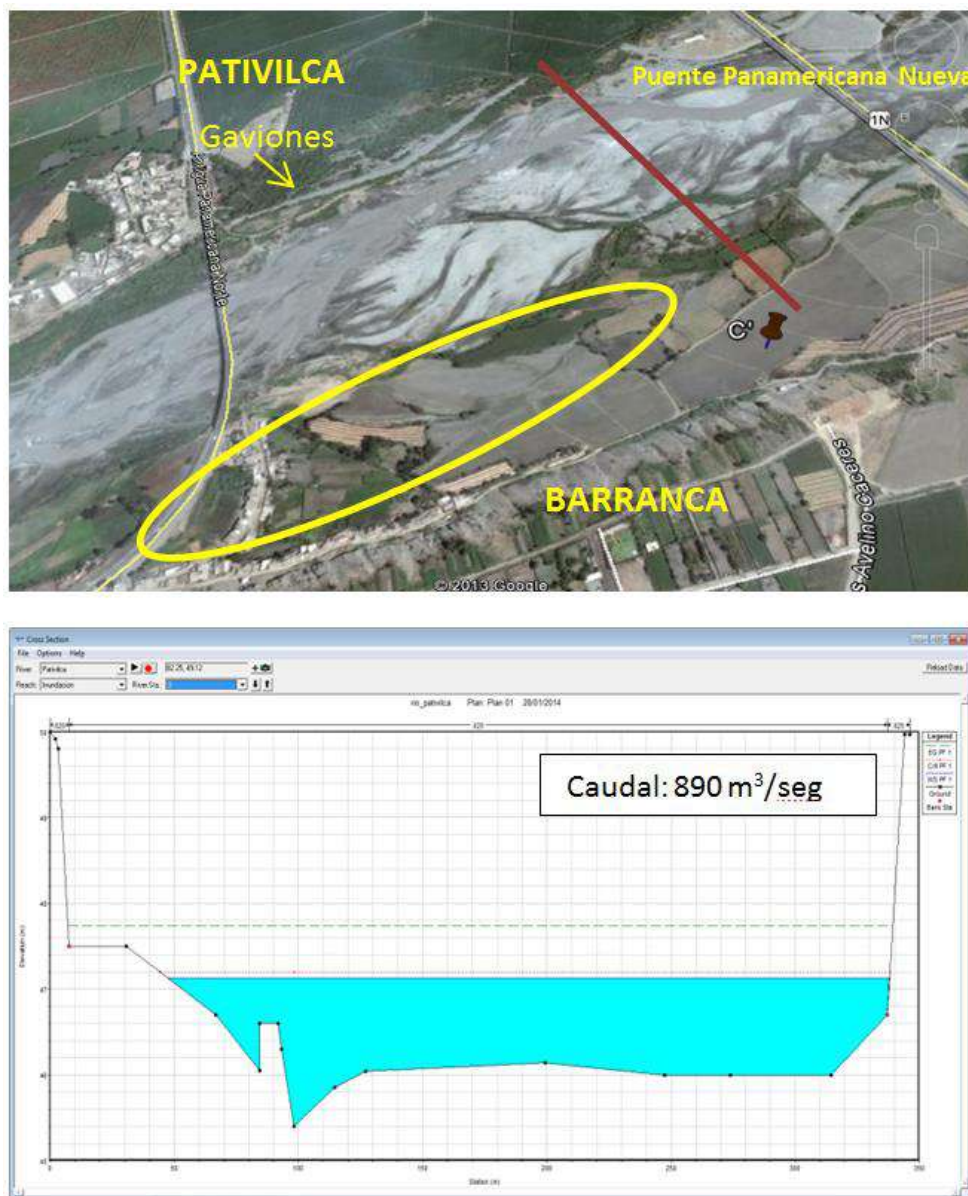


Figura 47: Simulación numérica para la Sección “C”. La zona de posible inundación está demarcada por el ovalo de color amarillo. Abajo, modelamiento de inundación con el caudal máximo

.- **Sección "D"**: La sección se encuentra a 300 m de la Antigua Panamericana Norte. Considerando el caudal máximo, la inundación en la margen izquierda afectaría básicamente a las zonas agrícolas (Figura 48).

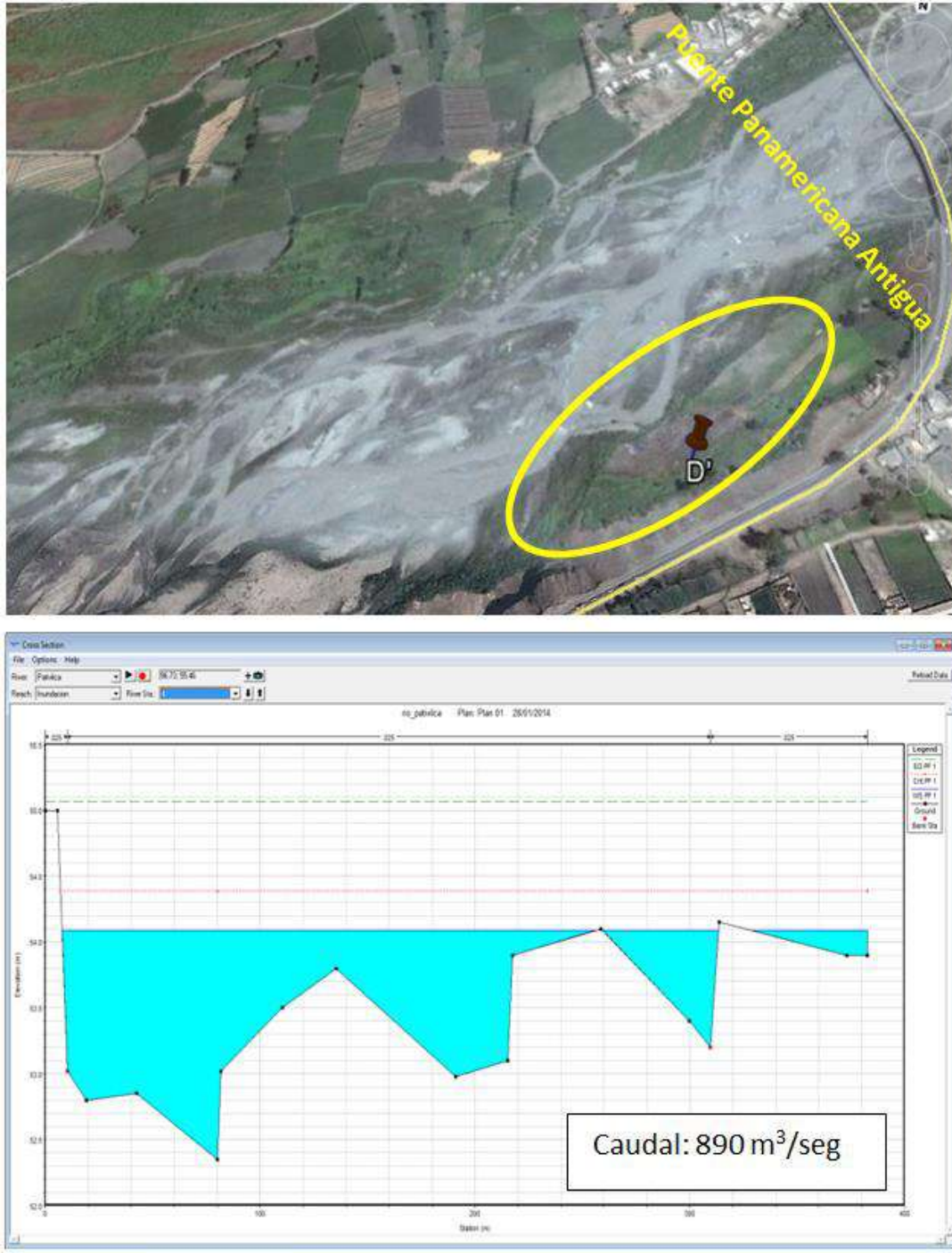


Figura 48: Simulación numérica para la Sección "D". La zona de posible inundación está demarcada por el ovalo de color amarillo. Abajo, modelamiento de inundación con el caudal máximo

.- **Sección “E”**: Esta sección se encuentra a 150 metros aproximadamente de la desembocadura del río Pativilca. La inundación afectaría la margen izquierda del río invadiendo terrenos agrícolas y zona de playa (Figura 49).

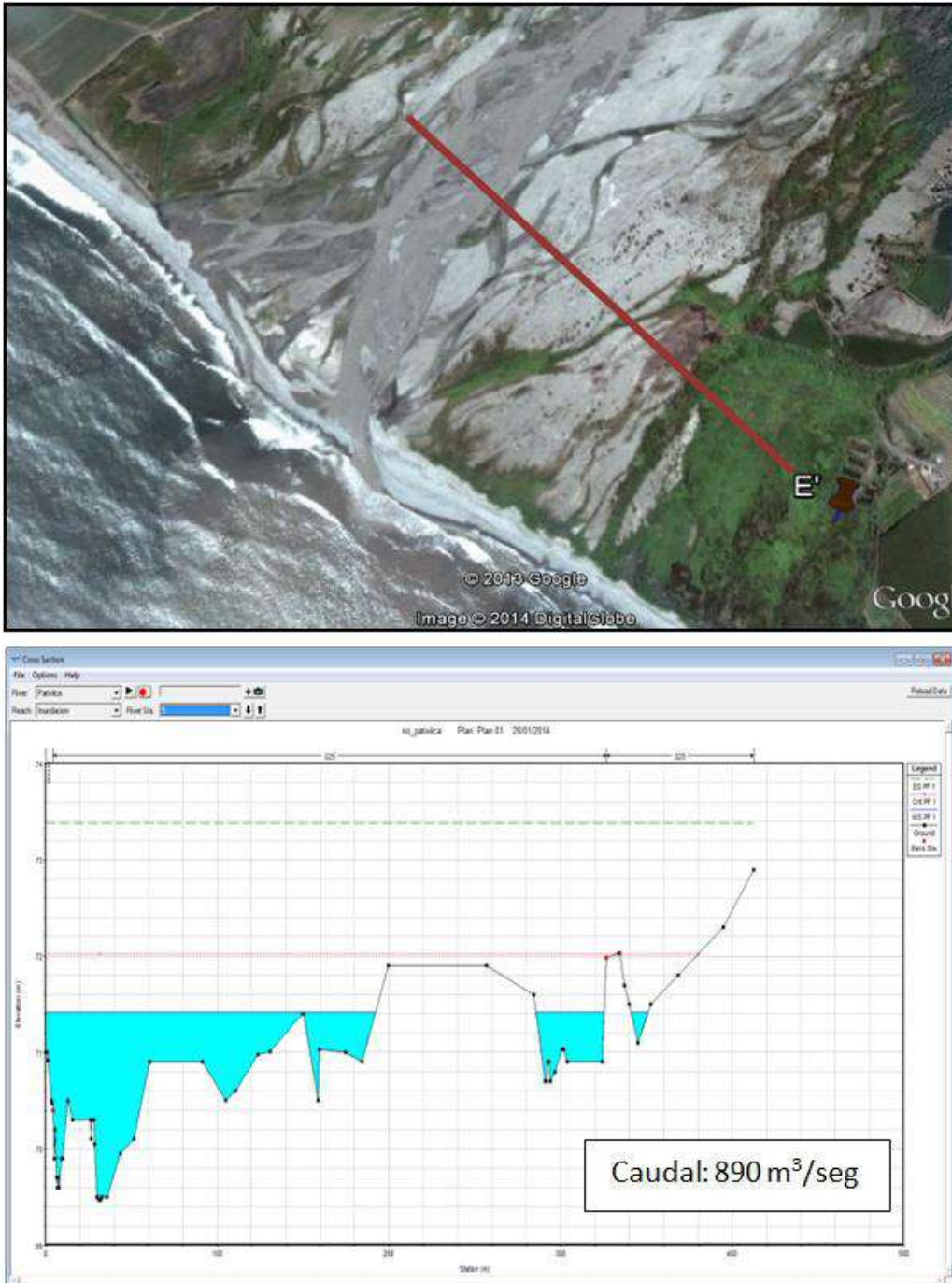


Figura 49: Simulación numérica para la Sección “E”. La zona de posible inundación abarcaría la margen izquierda del río cerca de su desembocadura. Abajo, modelamiento de inundación con el caudal máximo

## 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 Barranca se construyeron 16 calicatas (Figura 50, Tabla 5) y el análisis en laboratorio permitió clasificar a los suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). A fin de completar la información geotécnica, se procedió a realizar 9 muestreos adicionales de suelo utilizando una posteadora manual (Figura 50, Tabla 5). El total de la información geotécnica se muestra en el Anexo 2.

Tabla 5: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas y posteadora

| CALICATAS | NORTE(m) | ESTE (m) | ELEVACION(m) |
|-----------|----------|----------|--------------|
| B_01      | 8812953  | 196984   | 64           |
| B_02      | 8812612  | 199476   | 151          |
| B_03      | 8811157  | 196842   | 55           |
| B_04      | 8810385  | 197452   | 58           |
| B_05      | 8810923  | 198678   | 83           |
| B_06      | 8810802  | 198901   | 84           |
| B_07      | 8809704  | 197749   | 53           |
| B_08      | 8810149  | 198501   | 76           |
| B_09      | 8809854  | 198948   | 75           |
| B_10      | 8810182  | 199794   | 88           |
| B_11      | 8809012  | 197792   | 26           |
| B_12      | 8808927  | 198277   | 56           |
| B_13      | 8808476  | 198922   | 52           |
| B_14      | 8807772  | 198627   | 23           |
| B_15      | 8807493  | 199533   | 48           |
| B_16      | 8807423  | 199753   | 47           |

| POSTEADORA | NORTE   | ESTE   | COTA | PROFUNDIDAD (m) |
|------------|---------|--------|------|-----------------|
| P_01       | 8812270 | 197101 | 74   | 1.55            |
| P_02       | 8813006 | 198215 | 115  | 1.15            |
| P_03       | 8809711 | 198005 | 54   | 1.25            |
| P_04       | 8810538 | 198739 | 73   | 1.70            |
| P_05       | 8809635 | 198658 | 60   | 1.60            |
| P_06       | 8809416 | 198266 | 55   | 1.70            |
| P_07       | 8808040 | 198081 | 7    | 1.10            |
| P_08       | 8807361 | 199137 | 7    | 1.00            |
| P_09       | 8810786 | 199670 | 97   | 2.90            |

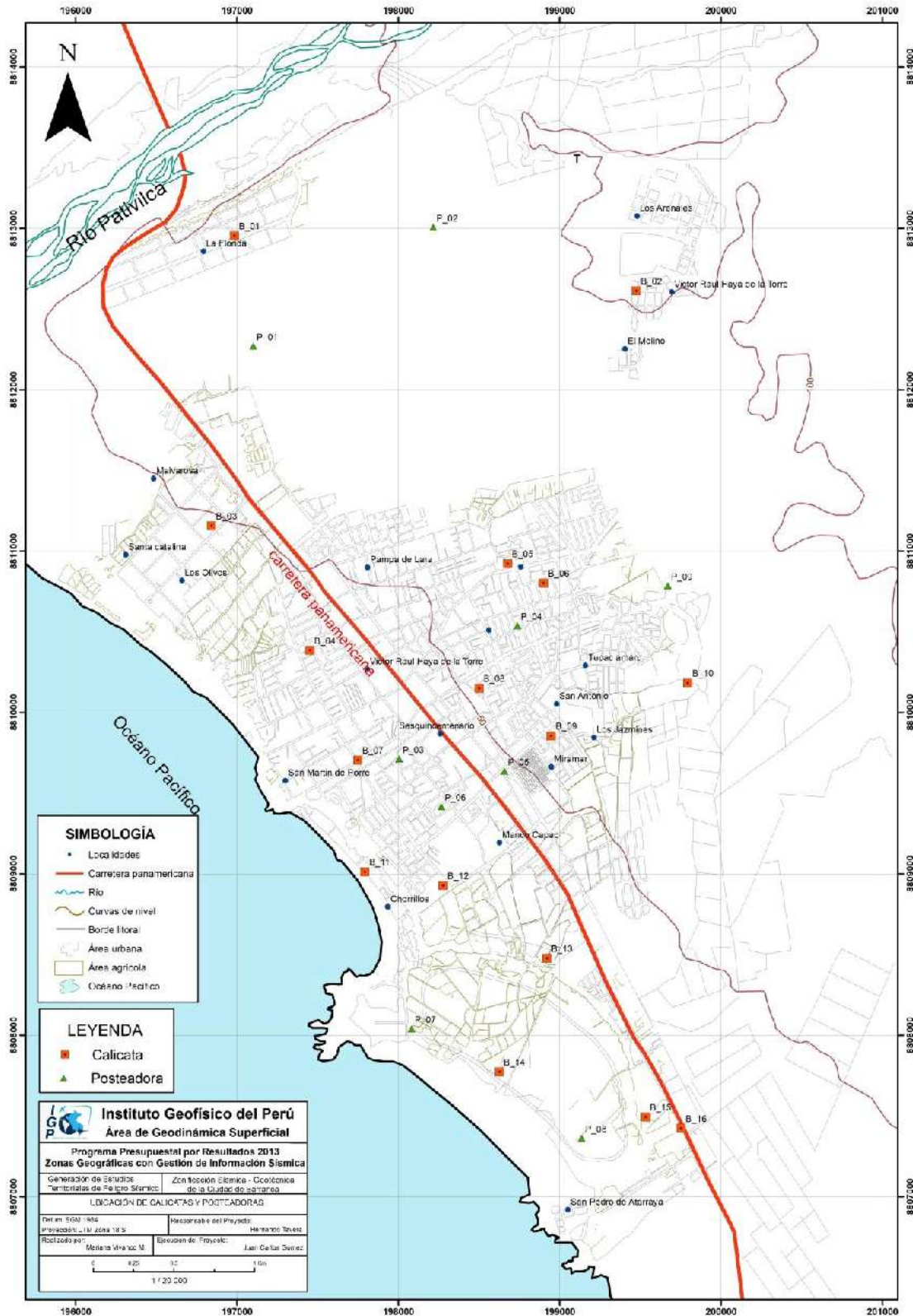


Figura 50: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Barranca

### 10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, posteos e inspección visual del terreno en la ciudad de Barranca y su posterior análisis en laboratorio, se ha identificado, según la clasificación SUCS, la existencia de 4 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Tabla 6, Figura 51):

*.- Suelo tipo GM: con arena: Corresponden a gravas limosas con arenas y se encuentran distribuidas sobre el 50% de área total de la ciudad de Barranca. Esta área considera a la Asoc. La Florida, Urb. Santa Catalina, Av. Lauriama, Urb. Las Gardenias, Av. Grau, Cuadra 3, Asoc. de Vivienda Villa Santa Rosa, Chaquilla Baja, Repartición y Antigua Carretera Panamericana (grifo Repsol). En este tipo de suelo el porcentaje de humedad varía entre 1.64% a 9.72%.*

*.- Suelo tipo SP: Corresponden a arena pobremente graduadas y se encuentran distribuidos sobre un 20% del área total de la ciudad de Barranca. Esta área considera al A.H. Víctor Raúl Haya de la Torre, Av. Chorrillos y Playa Bandurria (zona de humedales). En este tipo de suelo, el porcentaje de humedad es de 2.63% y 26.51% respectivamente.*

*.- Suelo tipo SM: Corresponden a arena limosa y se encuentra distribuida sobre un 15% del área total de la ciudad de Barranca. Esta área considera a la Urb. El Olivar y el AH. Manuel Bustamante/Cenicero. Estos suelos presentan un porcentaje de humedad entre 10.45% y 12.18% respectivamente.*

*.- Suelo tipo GP-GM con arena: Corresponde a grava pobremente graduada y grava limosa con arena, y se encuentran distribuidos sobre un 15% del área total de la ciudad de Barranca. Esta área considera la Urb. Independencia y la Intercepción de Av. Manco Cápac con Av. Lion. Estos suelos presentan un porcentaje de humedad entre 3.16% y 3.15% respectivamente.*

Tabla 6: Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Barranca

| 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                                     |
|----------|-----------------|-------------|-----------|---------------------|--------------------|--------------------------|------------------|------------------------|----------------|-----------------|--|
| B_01     | 2.00            | —           | —         | NP                  | NT                 | 3.22                     | 61               | 20                     | 19             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_02     | 2.60            | —           | —         | NP                  | NT                 | 2.63                     | 0                | 99                     | 1              | SP              | Arena pobr. graduada                             |
| B_03     | 1.90            | —           | —         | NP                  | NT                 | 4.9                      | 55               | 43                     | 2              | GP con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_04     | 2.00            | —           | —         | NP                  | NT                 | 3.16                     | 68               | 21                     | 1              | GP-GM con arena | Grava pobremente graduada-grava limosa con arena |
| B_05     | 2.10            | —           | —         | NP                  | NT                 | 3.39                     | 45               | 31                     | 24             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_06     | 2.20            | —           | —         | NP                  | NT                 | 2.1                      | 60               | 25                     | 15             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_07     | 2.30            | —           | —         | NP                  | NT                 | 9.72                     | 65               | 17                     | 18             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_08     | 2.50            | —           | —         | NP                  | NT                 | 10.45                    | 6                | 65                     | 28             | SM              | Arena limosa                                     |
| B_09     | 1.50            | —           | —         | NP                  | NT                 | 4.59                     | 61               | 21                     | 18             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_10     | 2.40            | —           | —         | NP                  | NT                 | 12.18                    | 0                | 52                     | 48             | SM              | Arena limosa                                     |
| B_11     | 1.50            | —           | —         | NP                  | NT                 | 26.51                    | 0                | 98                     | 2              | SP              | Arena pobr. graduada                             |
| B_12     | 1.70            | 109.63      | 34.18     | NP                  | NT                 | 3.15                     | 83               | 10                     | 7              | GP-GM           | Grava pobr. graduada-grava limosa                |
| B_13     | 1.80            | —           | —         | NP                  | NT                 | 3.22                     | 50               | 37                     | 13             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_14     | 1.25            | 1.38        | 0.96      | NP                  | NT                 | 28.73                    | 0                | 99                     | 1              | SP              | Arena pobr. graduada                             |
| B_15     | 2.60            | —           | —         | NP                  | NT                 | 4.05                     | 45               | 35                     | 20             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |
| B_16     | 2.50            | —           | —         | NP                  | NT                 | 1.64                     | 46               | 35                     | 19             | GM con arena    | Grava limosa con arena                           |

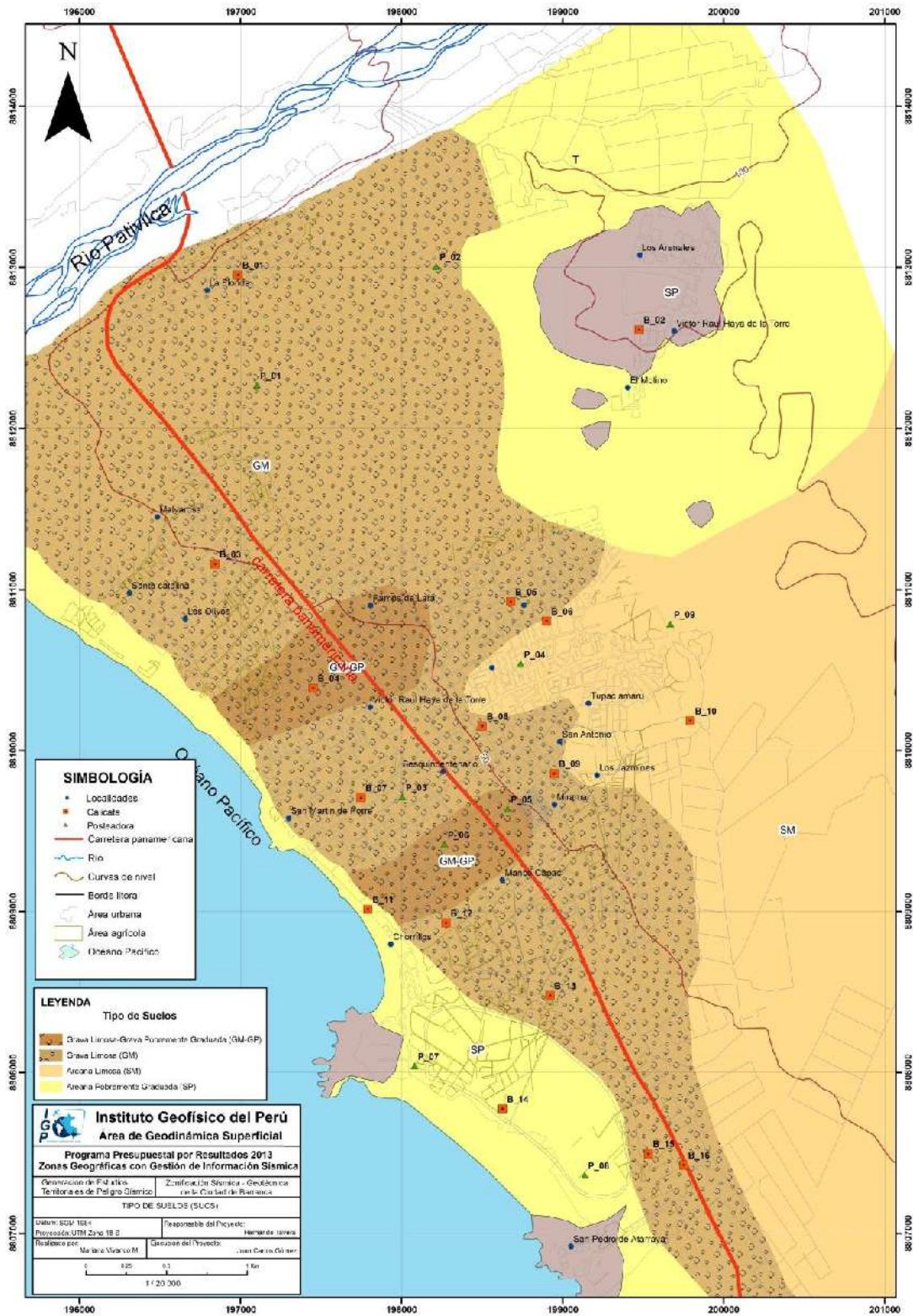


Figura 51: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Barranca

## 10.2.- Capacidad Portante

Para conocer la capacidad portante del suelo, se realizaron los ensayos de corte directo al material muestreado en las 16 calicatas elaboradas en la ciudad de Barranca. Los valores obtenidos en laboratorio corresponden a una profundidad y ancho mínimo de cimentación de 1.0 metro (Tabla 7). Estos valores fueron clasificados en rangos que definen la capacidad portante del suelo de media a muy alta (Tabla 8).

Tabla 7: Valores de capacidad portante para las calicatas elaboradas en la ciudad de Barranca

| CALICATAS | Angulo de Fricción interna del Suelo (°) | Cohesión Aparente del Suelo (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Densidad seca Promedio (gr/cm <sup>3</sup> ) (< N° 4) | Humedad Natural (%) | Capacidad Carga Admisible (Kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|--|---|---|---------------------|---|
| B_01      | 30.61                                    | 0.00  | —   | 3.22                | 2.45  |
| B_02      | 30.90                                    | 0.00  | 1.600   | 2.63                | 2.08  |
| B_03      | 30.79                                    | 0.00  | —   | 4.90                | 2.50  |
| B_04      | 29.85                                    | 0.00  | —   | 3.16                | 2.17  |
| B_05      | 30.28                                    | 0.00  | —   | 3.39                | 2.25  |
| B_06      | 29.95                                    | 0.00  | —   | 2.10                | 2.24  |
| B_07      | 30.25                                    | 0.00  | —   | 9.72                | 2.33  |
| B_08      | 30.00                                    | 0.05  | 1.650   | 10.45               | 1.98  |
| B_09      | 30.56                                    | 0.00  | —   | 4.59                | 2.44  |
| B_10      | 30.00                                    | 0.00  | 1.600   | 12.18               | 1.85  |
| B_11      | 31.00                                    | 0.00  | 1.650   | 26.51               | 2.17  |
| B_12      | 30.03                                    | 0.00  | —   | 3.15                | 2.29  |
| B_13      | 30.56                                    | 0.00  | —   | 3.22                | 2.24  |
| B_14      | 30.50                                    | 0.00  | 1.650   | 28.73               | 2.04  |
| B_15      | 31.50                                    | 0.01  | 1.600   | 4.05                | 2.27  |
| B_16      | 30.57                                    | 0.00  | —   | 1.64                | 2.35  |

Tabla 8: Rangos de capacidad portante para la ciudad de Barranca

| Capacidad de Carga (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Denominación |
|--|--------------|
| 2.00 – 300                               | MEDIO        |
| 1.00 – 2.00                              | BAJA         |

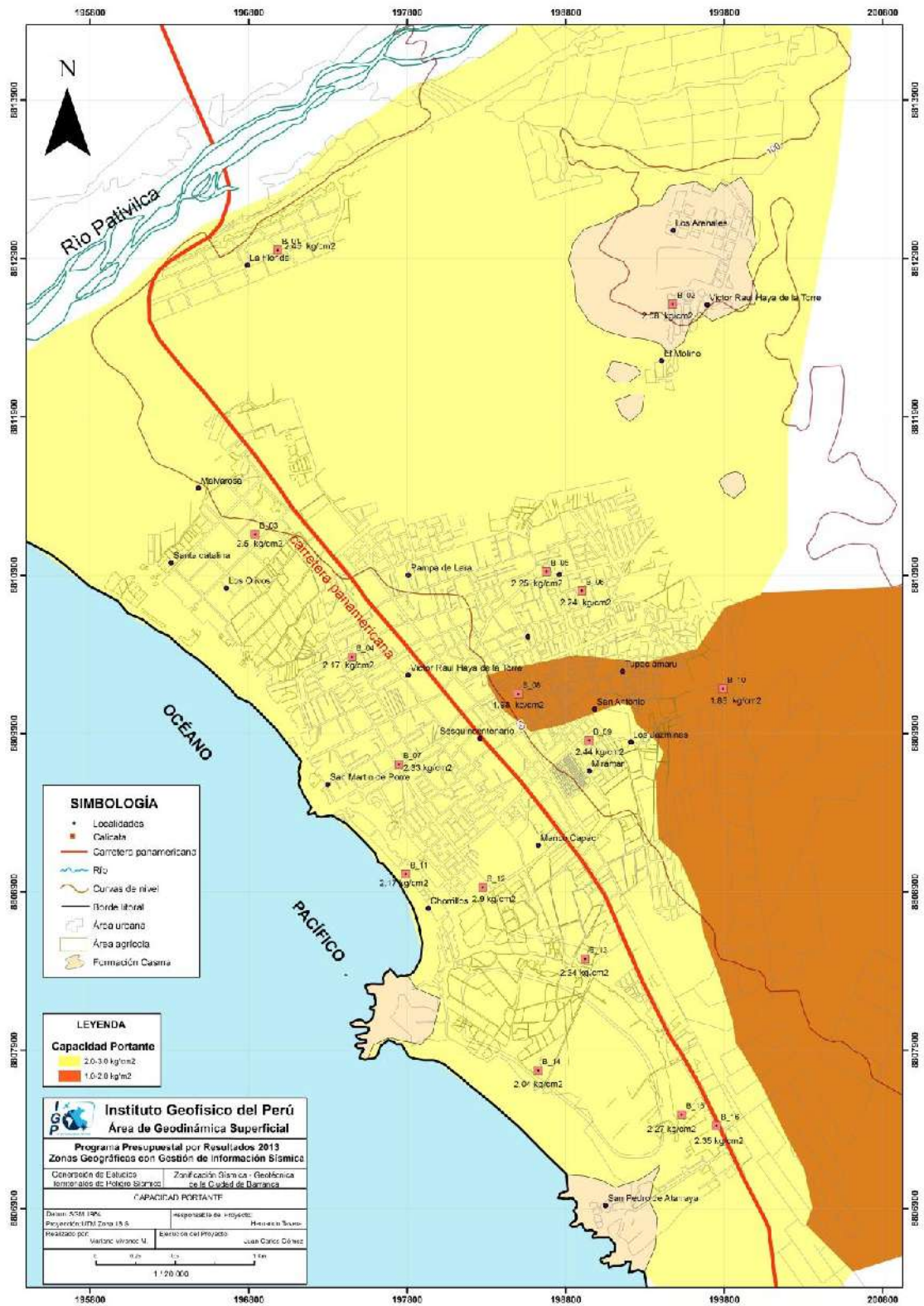


Figura 52: Mapa de capacidad portante en la ciudad de Barranca

Los resultados obtenidos permiten identificar para la ciudad de Barranca valores de capacidad portante Media y Baja resistencia al corte (Figura 52). En toda la ciudad de Barranca prevalece la capacidad portante Media y solamente en las áreas de la Urb. El Olivar y el A.H Manuel Bustamante, la capacidad portantes es Baja.

### 10.3.- Nivel Freático Superficial

En la ciudad de Barranca se ha evidenciado que en los sectores con niveles topográficos bajos, cercanos al litoral, existen zonas donde el nivel freático es superficial a tal punto que constituyen zonas pantanosas. Del mismo modo, en estas zonas existen puntos de surgencias de agua que son aprovechadas por los pobladores para actividades de lavado de ropa y otros, así como fuentes para proveer agua a las piscinas ubicadas en la playa Chorrillos (Figura 53). El nombre de Chorrillos viene de esta particular presencia de agua superficial.



*Figura 53: Presencia de agua subterránea en la parte baja de los acantilados ubicados en el extremo oeste de la ciudad de Barranca.*

## 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 física. A continuación, se describe el desarrollo de estos métodos y los principales resultados obtenidos en cada caso para la ciudad de Barranca.

### 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 Barranca, 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. En la Figura 54 se muestra la distribución espacial de los 360 puntos de registro de vibración ambiental, cada uno con una duración de 20 minutos, lo cual permite tener buena cantidad de información para su posterior análisis.

El análisis de la información recolectada en los diferentes puntos de registro, permite obtener espectros de Fourier para sus tres componentes y a partir de la razón de estos (componentes horizontales / componente vertical), se determinan las frecuencias predominantes y/o periodos dominantes de vibración natural del subsuelo y en algunos casos, la amplificación sísmica relativa. En la Figura 55 se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el punto BRC-012. En su extremo superior se muestra el registro de vibración ambiental (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 de 1.7 Hz, 6.5 Hz y 20.3 Hz con amplificaciones relativas de 3, 5 y 3 veces respectivamente; y hacia el extremo inferior derecho la variación azimutal de la amplitud de las vibraciones generadas por la cantidad de energía inducida al medio (espectrograma) a 6.5 Hz y 20.3 Hz en dirección norte-sur, y la irradiada a 1.7 Hz en dirección este-oeste. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

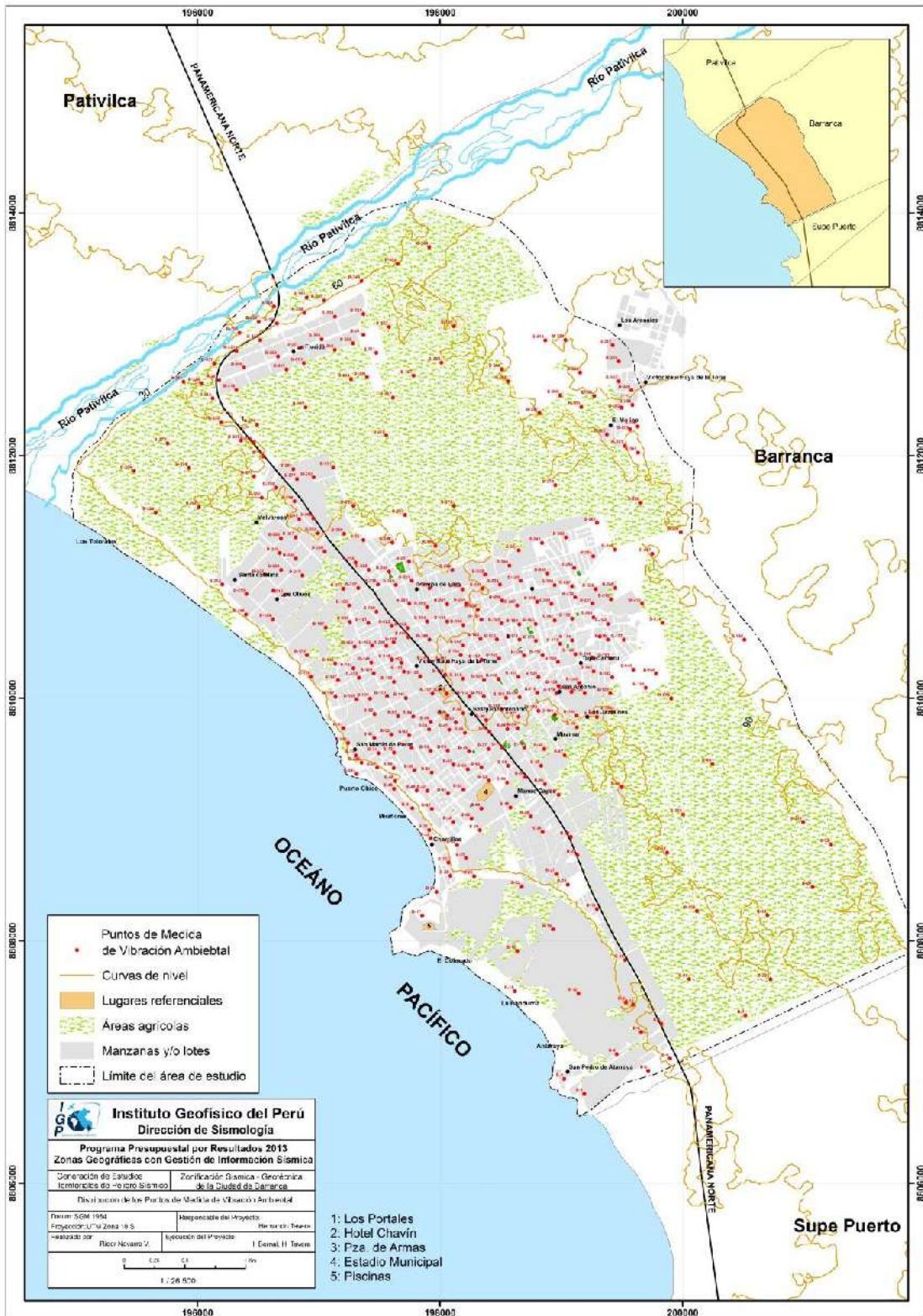


Figura 54: Mapa de la ciudad de Barranca distribución de puntos de registro de vibración ambiental

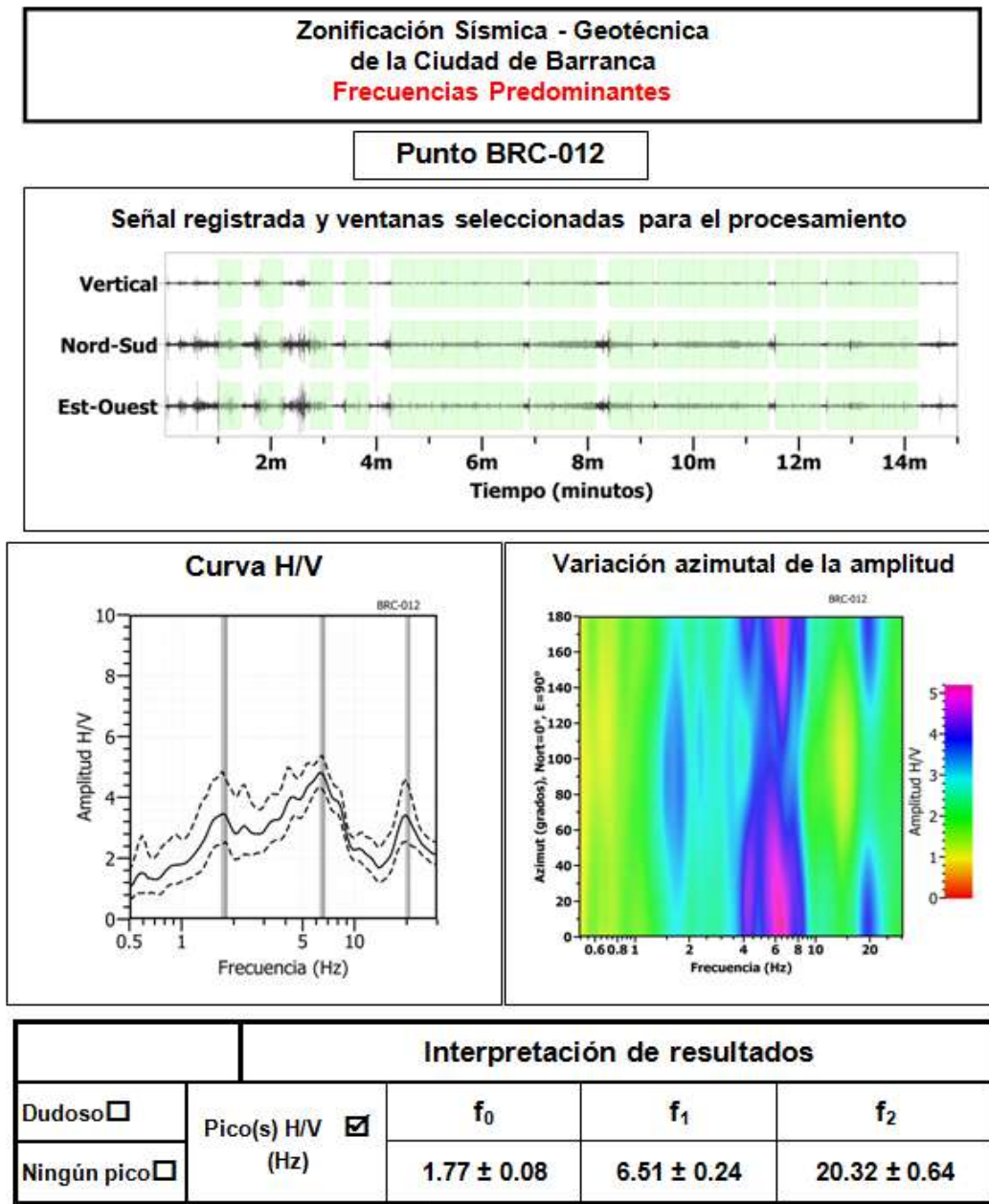


Figura 55: Ejemplo de la ficha H/V para el punto BRC-012 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

**.- 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, observando que valores similares 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.

El análisis de la información 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 un mejor análisis de la información obtenida para las razones espectrales H/V, se procedió a construir mapas de frecuencias predominantes considerando tres rangos: **F<sub>0</sub>** ( $F < 3.0\text{Hz}$ ), **F<sub>1</sub>** ( $3.0 < F < 10\text{Hz}$ ) y **F<sub>2</sub>** ( $F > 10\text{Hz}$ ). 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 muy complejo. A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Barranca.

*En la Figura 56, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes **F<sub>0</sub>** ( $F_0 < 3.0\text{Hz}$ ); todas de manera regular sobre todo el área de estudio, sobresaliendo frecuencias en el rango de 1.0 y 2.0 Hz. En la Figura 57 se muestra ejemplos de H/V obtenidos para este rango de frecuencias (ver Figura 56), con amplitudes relativas de 2 a 3 veces.*

*Por ejemplo, las H/V para el punto BRC-171 (extremo Este de la ciudad de Barranca), muestran el predominio de frecuencias de 1.6 Hz con amplificaciones de hasta 4 veces con respecto a los puntos BRC-134 y BRC-071, con frecuencias de 1.5 Hz y amplificaciones mínimas. Estos resultados sugieren que existe un incremento en las amplitudes de la señal de dirección Este con respecto al centro de la ciudad.*

*En las H/V obtenidas para los puntos BRC-043, BRC-181 y BRC-233, ubicados el primero hacia el Sur del área central de la ciudad de Barranca y los dos últimos, hacia su extremo Norte, resaltan frecuencias alrededor de 1.5 Hz con mínimas amplificaciones.*

*En las H/V de los puntos BRC-019, BRC-288 y BRC-330 ubicados en los extremos Sur (Urb. Chorrillos), Este (Urb. Los Molinos) y Norte (Urb. La Florida) de la ciudad de Barranca, se observa los mismos valores de frecuencias con un ligero incremento en sus amplificaciones.*

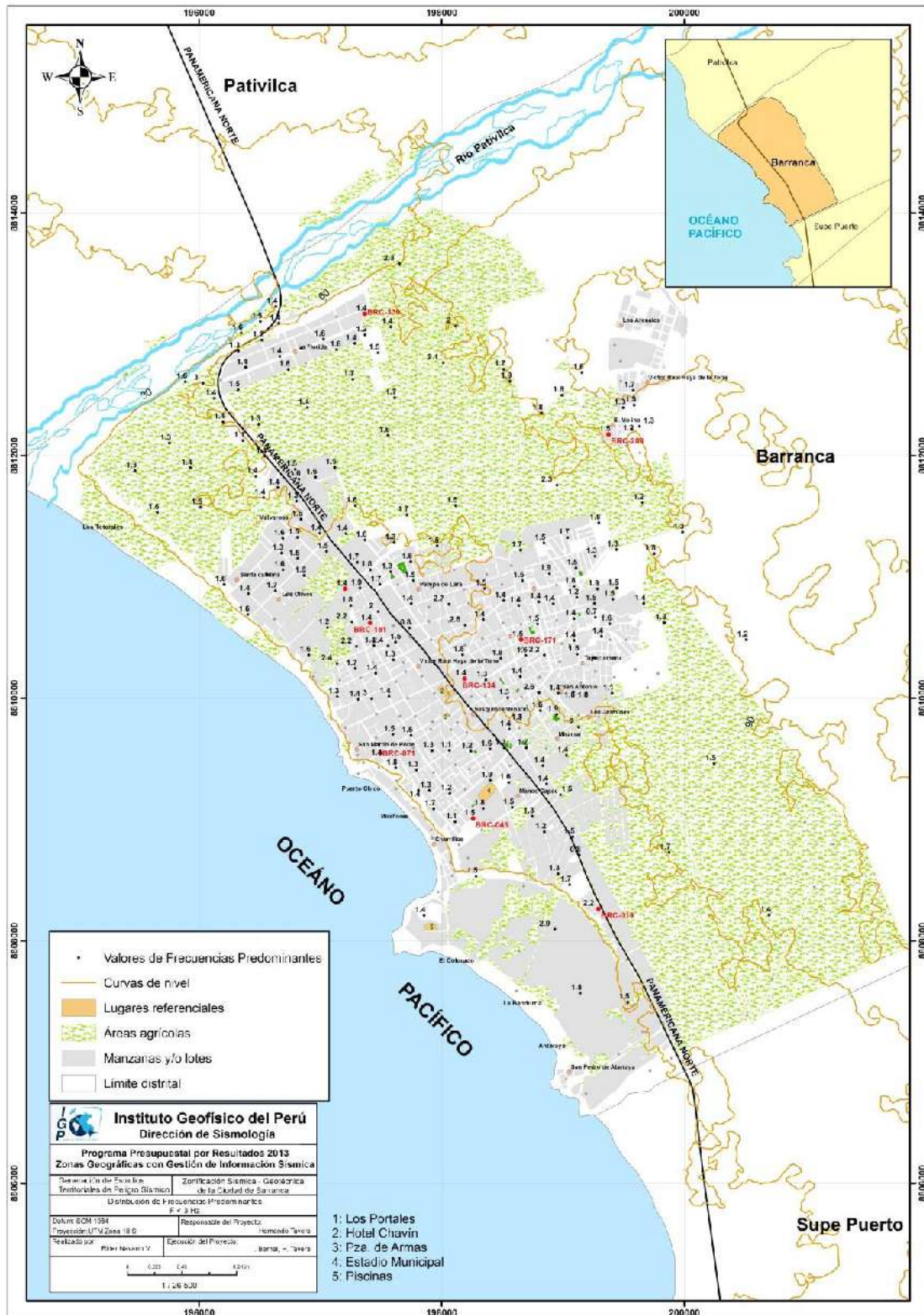
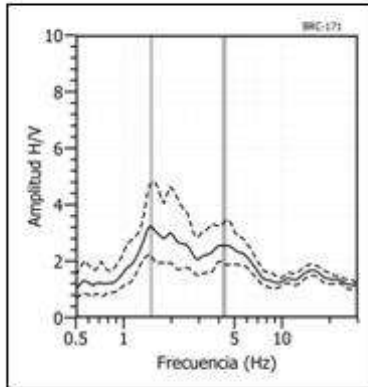
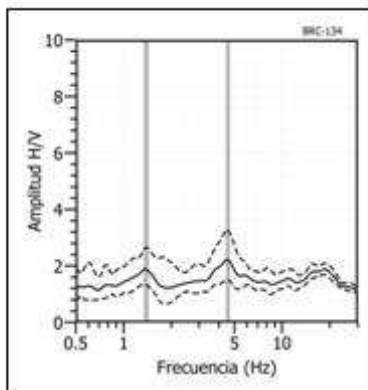


Figura 56: Mapa de la ciudad de Barranca y distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_o$  ( $F_o < 3.0$  Hz). Los puntos rojos corresponden a ejemplos de H/V de la Figura 57

**BRC-171**



**BRC-134**



**BRC-71**

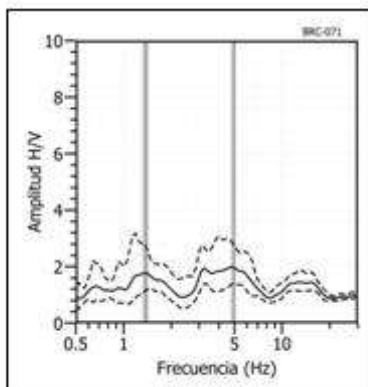
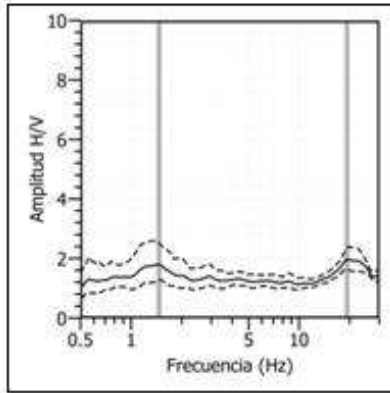
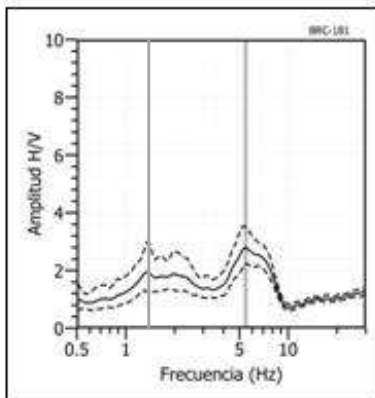


Figura 57: Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el área central de la ciudad de Barranca. El rango de frecuencias predominantes es  $F_0$  ( $F_0 < 3.0$  Hz). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

**BRC-43**



**BRC-181**



**BRC-233**

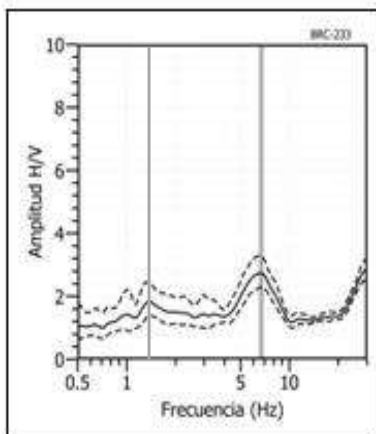
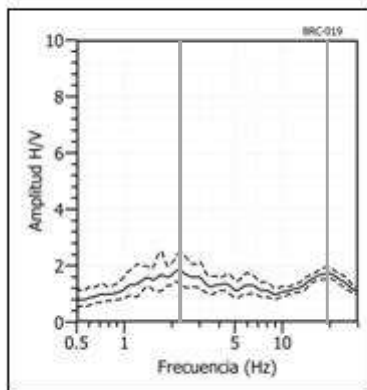
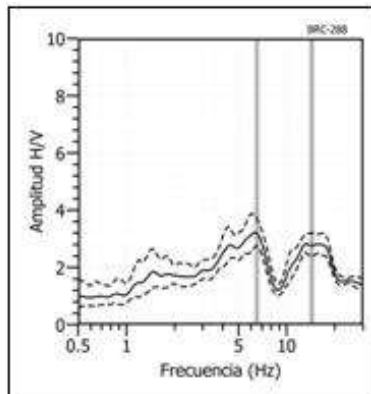


Figura 57: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en la zona céntrica de la ciudad de Barranca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

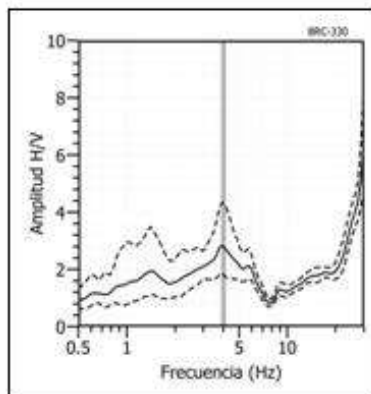
**BRC-19**



**BRC-288**



**BRC-330**



**Figura 57:** ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en la zona céntrica de la ciudad de Barranca. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

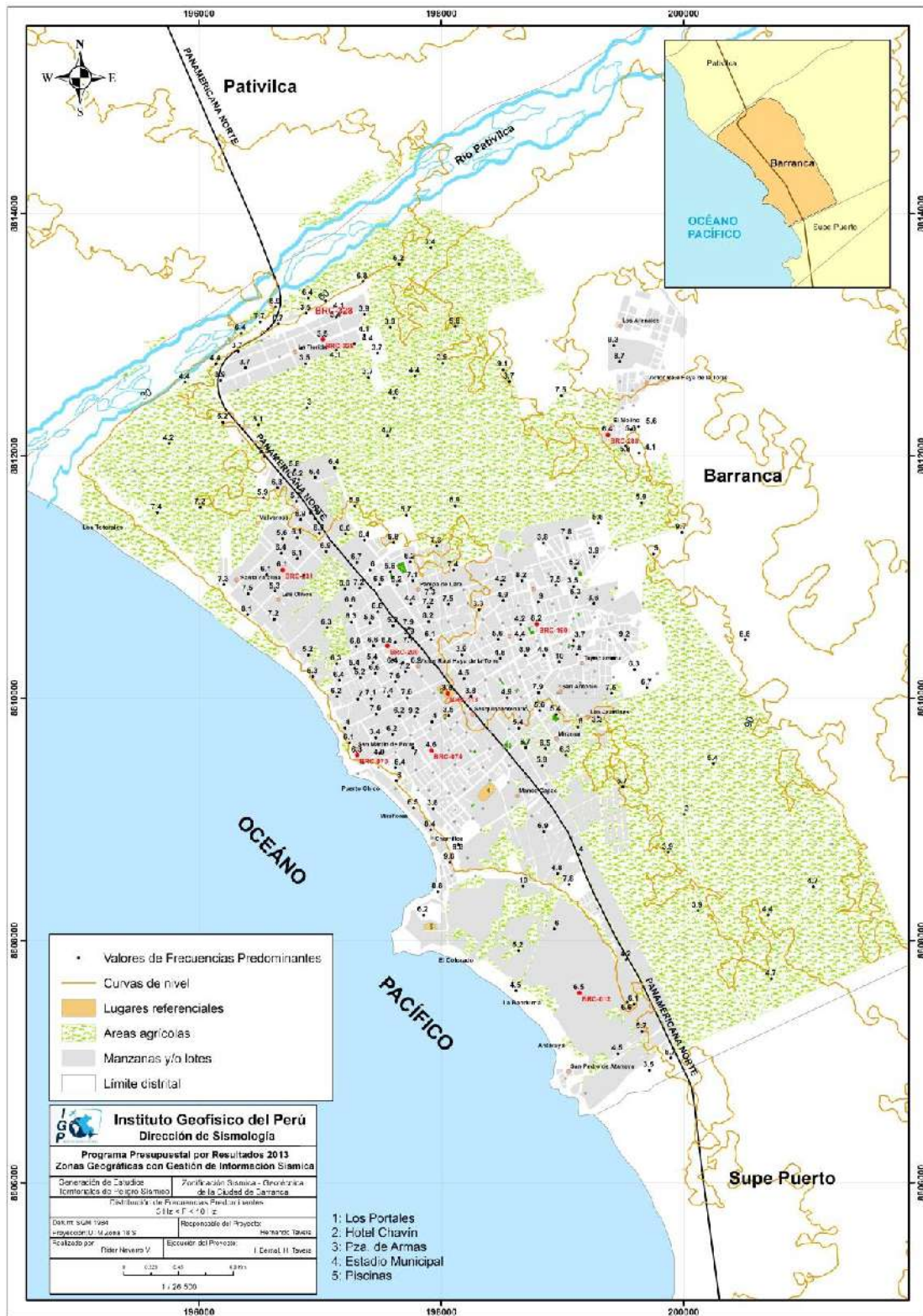
Estos resultados, evidencian que el rango de frecuencias  $F_0$  influye en menor porcentaje en la respuesta dinámica de los suelos de Barranca por la poca amplificación que presenta, excepto en el extremo Este de la ciudad, donde  $F_0$  tiene mayor dominio, aunque muestra una clara tendencia a valores mayores. En este caso, el rango de frecuencia caracteriza a estratos de gran potencia.

En la Figura 58, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_1$  ( $3.0 < F < 10\text{Hz}$ ) en la ciudad de Barranca y en la Figura 59, ejemplos de las mismas seleccionadas de manera aleatoria. Para el centro de la ciudad de Barranca, las H/V para los puntos BRC-190 (extremo Este) fluctúan en 8 Hz con amplificaciones de 2 veces; BRC-113 (parte central) en 3.5 Hz con amplificaciones de 3 veces y en BRC-070, frecuencias de 6 a 8 Hz con amplificaciones de 4 veces. Esta variación de frecuencias y amplificaciones son notorias conforme se tiene hacia la línea de costa.

Las razones H/V obtenidas para los puntos BRC-074, BRC-200 y BRC-231, ubicado el primero en dirección Sur desde la ciudad de Barranca y los dos últimos, hacia su extremo Norte, presentan frecuencias predominantes a 4.8 Hz (extremo sur) y entre 5 y 7 Hz (extremo norte), con amplificaciones de hasta 3 veces.

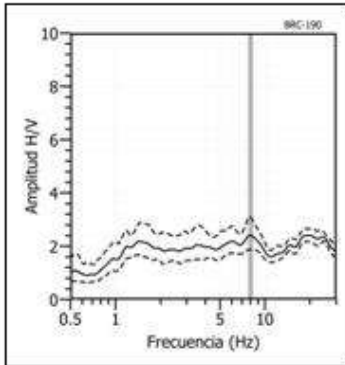
En las razones H/V para los puntos BRC-012 Urb. Chorrillos), BRC-288 (Urb. Los Molinos) y BRC-328 (urb. La Florida), sobresalen frecuencia de 6 a 7 Hz con amplificaciones del orden de 5 veces, tendiendo a incrementarse de la dirección Este hacia el Sur. En puntos ubicados cerca del río Pativilca como BRC-328, sobresalen frecuencias a 3.5 Hz; es decir, menor a las frecuencias observadas en BRC-012 y BRC-288, pero con amplificaciones de hasta 4 veces.

Estos resultados muestran que el rango de frecuencias  $F_1$ , domina las características dinámicas de los suelos presentes en la ciudad de Barranca; concentrándose valores menores (3 a 5 Hz) en la zona ubicada próximos al río Pativilca y en el extremo Este de la ciudad de Barranca. En relación a las amplificaciones máximas, estas tienden a incrementarse en dirección a la línea de costa. Este rango de frecuencias caracteriza al sustrato superficial y de menor espesor con respecto a  $F_0$ .

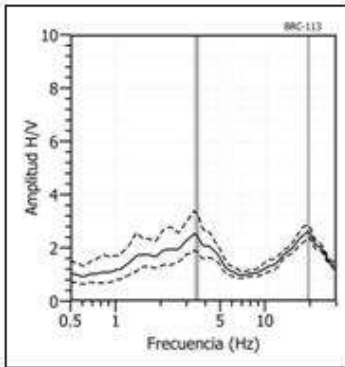


**Figura 58:** Mapa del área de estudio y distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_1$  ( $3.0 < F < 10.0$  Hz). Los puntos sin valor, indican ausencia de frecuencias predominantes en este rango.

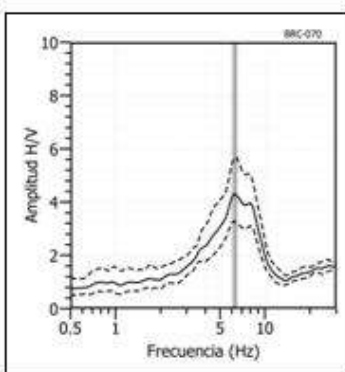
**BRC-190**



**BRC-113**

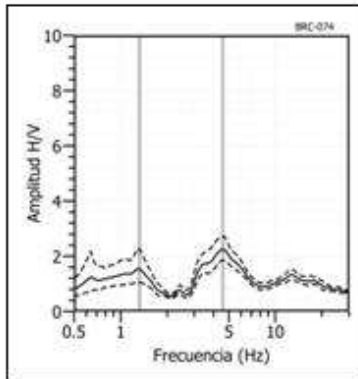


**BRC-70**

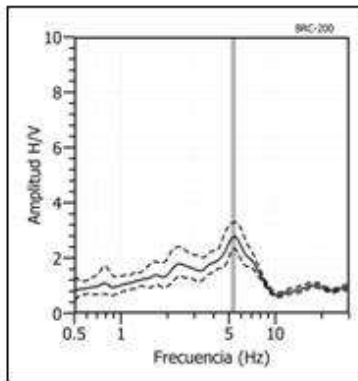


**Figura 59:** Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para puntos ubicados en la zona central de la ciudad de Barranca: BRC-190 (extremo Este), BRC-113 (parte central) y BRC-70 (extremo Oeste). El rango de frecuencias predominantes es **F1** ( $3.0 < F < 10.0$ Hz). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia que sobresale en este rango.

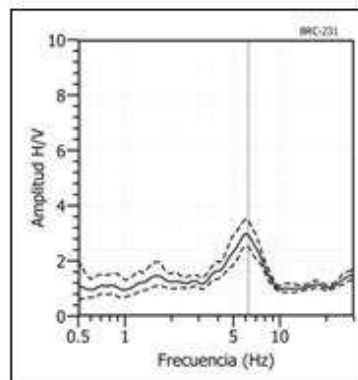
**BRC-74**



**BRC-200**

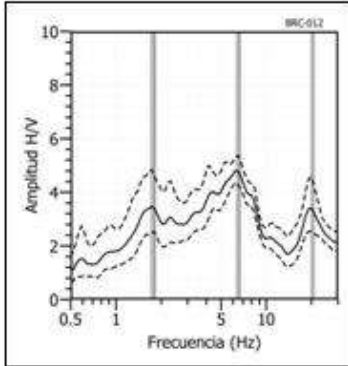


**BRC-231**

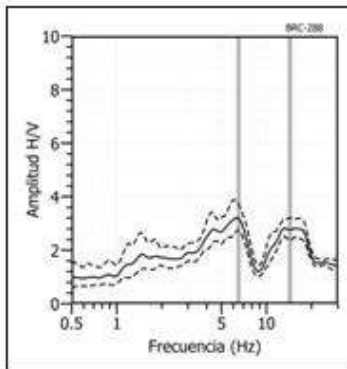


**Figura 59:** ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos ubicados hacia el extremo Norte (BRC-200 y BRC-231) y sur (BRC-74) de la ciudad de Barranca.

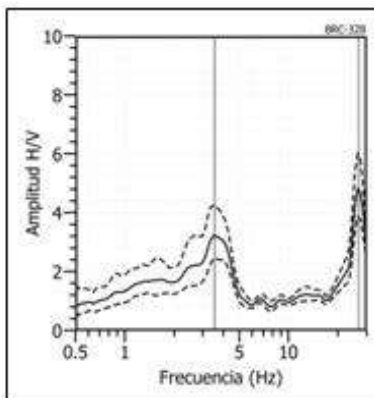
**BRC-12**



**BRC-288**



**BRC - 328**



**Figura 59:** ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos ubicados en los extremos de la ciudad de Barranca. BRC-12, Urb. Chorrillos (extremo sur); BRC-288, Urb. Los Molinos (extremo Este) y BRC-328, Urb. La Florida, próximo al río Pativilca (extremo Norte).

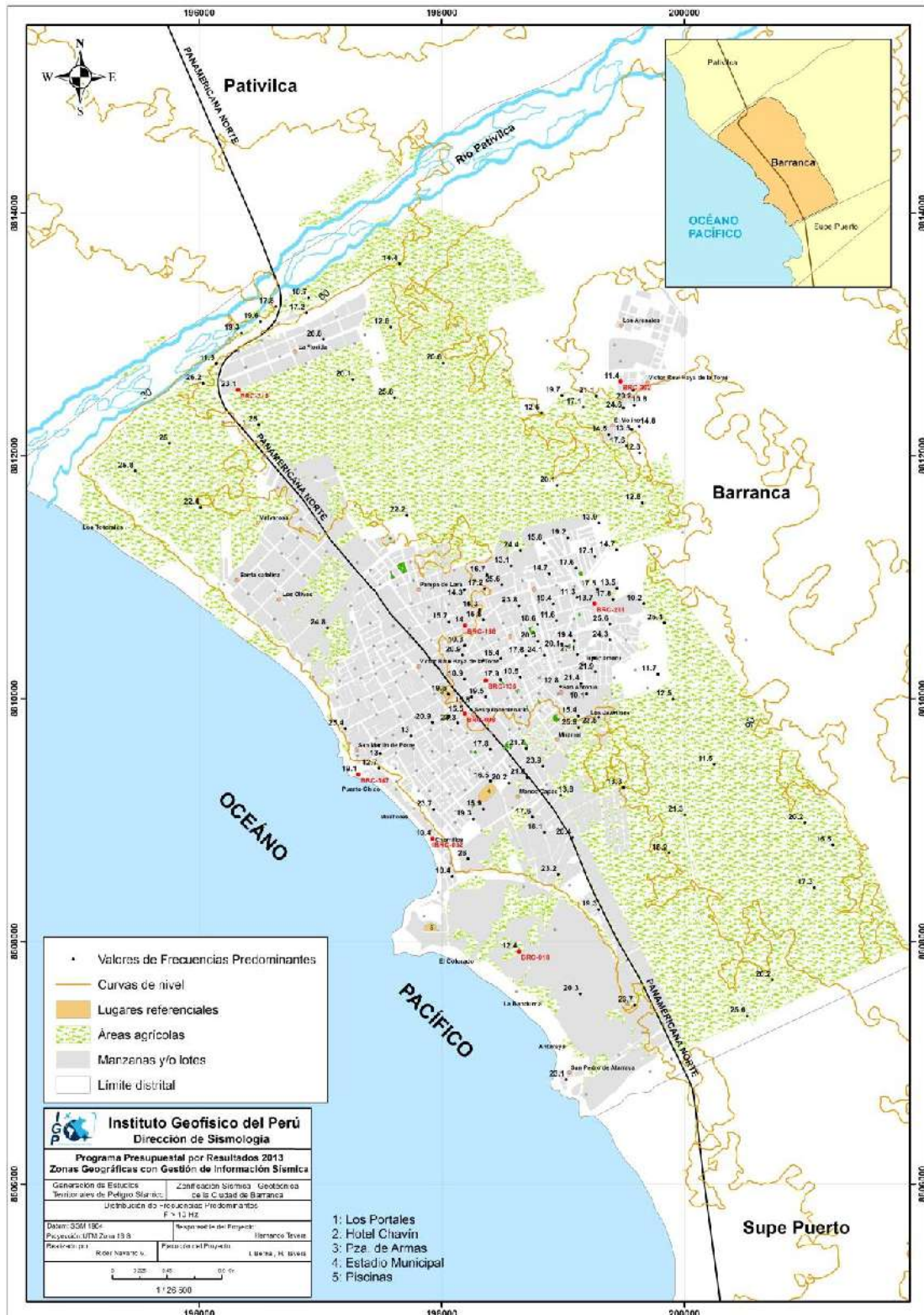
En la Figura 60, se muestra la distribución espacial de las frecuencias predominantes **F2** ( $F > 10\text{Hz}$ ); las cuales se distribuyen principalmente en dirección Este con respecto a la zona céntrica de la ciudad de Barranca. En general, para esta frecuencia se ha observado amplificaciones relativas de hasta 6 veces para algunos puntos.

En la Figura 61, las razones H/V muestran, por ejemplo, para el punto BRC-211 (extremo Este de la ciudad) frecuencias predominantes a 12 Hz, en BRC-135 (centro de la ciudad) frecuencias de 16 Hz y en el punto, BRC-347 (extremo oeste de la ciudad) frecuencias a 20 Hz, con amplificaciones de 5 veces para el punto BRC-211 y para los otros dos puntos, de 2 veces. Estos resultados sugieren el predominio de frecuencias en el extremo Este de la ciudad de Barranca.

La razón H/V obtenida para el punto BRC-032 ubicados en el extremo Sur de la ciudad, se tiene frecuencias predominantes a 10 Hz; mientras que, para los puntos BRC-098 y BCR-186 en el centro y extremo Norte las frecuencias se incrementan a 16 Hz, en este caso con amplificaciones de hasta 5 veces.

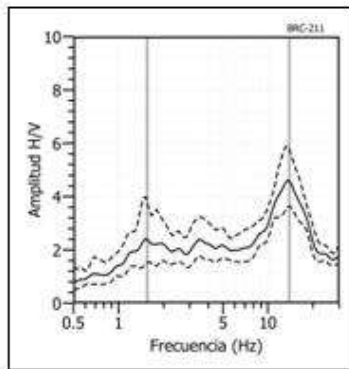
Para las razones H/V correspondientes a las Urbanizaciones Chorrillos (BRC-018), Los Molinos (BRC-302) y La Florida (BRC-315), se tiene el predominio de frecuencias mayores a 10 Hz con amplificaciones de 2 veces. Para el punto BRC-018 esta frecuencia es enmascarada por otra de 5.2 Hz; mientras que, en el punto BRC-302 es claro el dominio de frecuencias a 12 Hz con amplificaciones de hasta 6 veces.

*Estos resultados muestran que el rango de frecuencias para F2 se concentra principalmente en el extremo Este de la ciudad de Barranca, con amplificaciones máximas relativas de hasta 6 veces. Este rango de frecuencia caracteriza a la capa más superficial del subsuelo.*

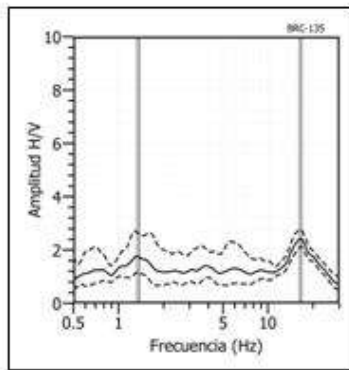


**Figura 60:** Mapa del área de estudio y distribución espacial de las frecuencias predominantes  $F_2$  ( $F > 10$  Hz). Los puntos sin valor, indican ausencia de frecuencias predominantes en este rango.

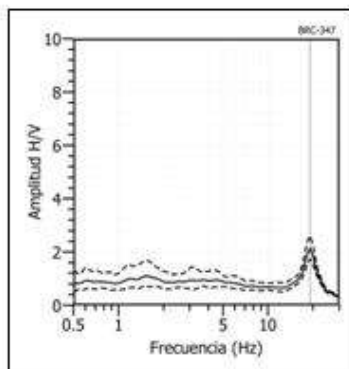
**BRC-211**



**BRC-135**

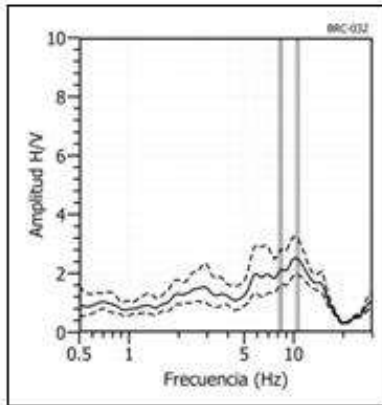


**BRC-347**

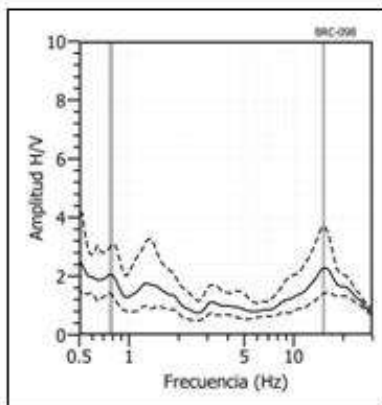


**Figura 61:** Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para puntos ubicados en la zona central de la ciudad de Barranca: BRC-211 (extremo Este), BRC-135 (parte central) y BRC-347 (extremo Oeste). El rango de frecuencias predominantes es F2 ( $F > 10\text{Hz}$ ). Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen las frecuencias predominantes

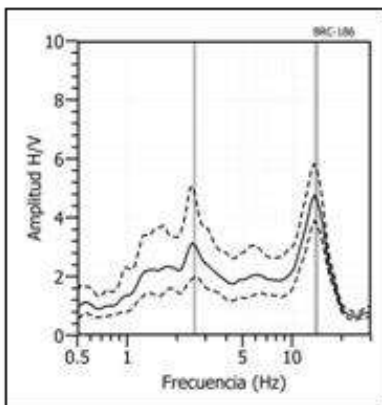
**BRC-32**



**BRC-98**

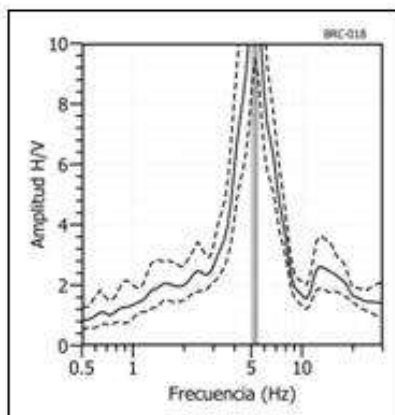


**BRC-186**

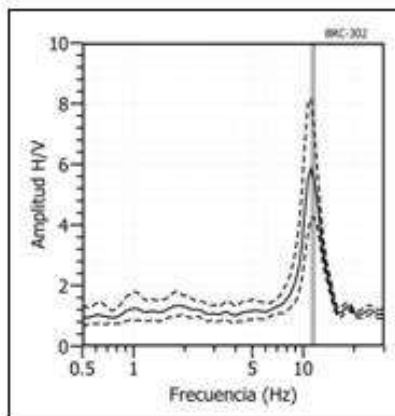


**Figura 61:** ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos ubicados en el extremo Norte (BRC-186) y sur (BRC-98 y BRC-32) de la ciudad de Barranca.

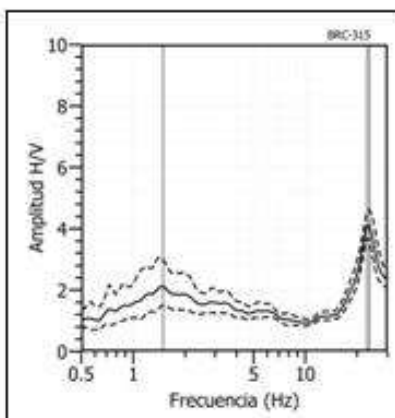
**BRC-18**



**BRC-302**



**BRC-315**



**Figura 61:** ...Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) obtenidas para los puntos ubicados en las Urbanizaciones de Chorrillos (BRC-18), Los Molinos (BRC-302) y La Florida, próximo al río Pativilca (BRC-315).

## 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 62 se muestra la distribución espacial de los valores de periodos dominantes en la ciudad de Barranca, los cuales han sido separados en dos grupos, en color negro para periodos menores a 0.4 segundos y azul para periodos mayores.

Los periodos menores a 0.4 segundos, son mayoritarios en el rango de 0.1 y 0.3 segundos, todos distribuidos de manera casi uniforme sobre toda la ciudad de Barranca, aunque los valores de 0.3 segundos se agrupan principalmente en la zona céntrica de la ciudad con una ligera tendencia en dirección NE-SO (Figura 62, área delimitada sobre el mapa por una línea discontinua). Los periodos mayores a 0.4 segundos, son mayoritarios en el rango de 0.5 y 0.8 segundos y tal como se comentó antes, también se distribuyen en toda el área de estudio, excepto en áreas pequeñas ubicadas en dirección NO y Este de la Plaza de Armas. En dirección NO, con respecto al estadio de Barranca, no se tiene predominio de periodo.

Los periodos dominantes que caracterizan los suelos de la ciudad de Barranca están relacionados con las condiciones físico-dinámicas a través de la relación  $T_0=4H/V_s$ , donde  $T_0$  es el periodo dominante,  $H$  el espesor del estrato y  $V_s$  es la velocidad de onda de corte. Asumiendo velocidades de 250 m/s y 350 m/s para las ondas de corte ( $V_s$ ) y periodos de 0.2 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 12 y 18 metros. Del mismo modo, al considerar periodos de 0.3 segundos, los espesores de las capas del suelo varían entre 18 a 25 metros. Estos valores para los espesores de las capas son confirmados con los modelos de velocidad y espesores de capas obtenidos con los arreglos sísmicos (ver punto 11.3).

*En la ciudad de Barranca, la distribución espacial de periodos mayores a 0.4 segundos sugiere la presencia en el subsuelo de una capa profunda de gran potencia y los periodos menores, una capa superficial de menor potencia, donde la primera influye moderadamente sobre la segunda. Por otro lado, si los valores de 0.3 y 0.4 segundos se distribuyen principalmente en la zona céntrica de la ciudad y próximos al río*

Pativilca, ellos sugieren que la capa superficial presenta mayor espesor en comparación con el resto del área de estudio.

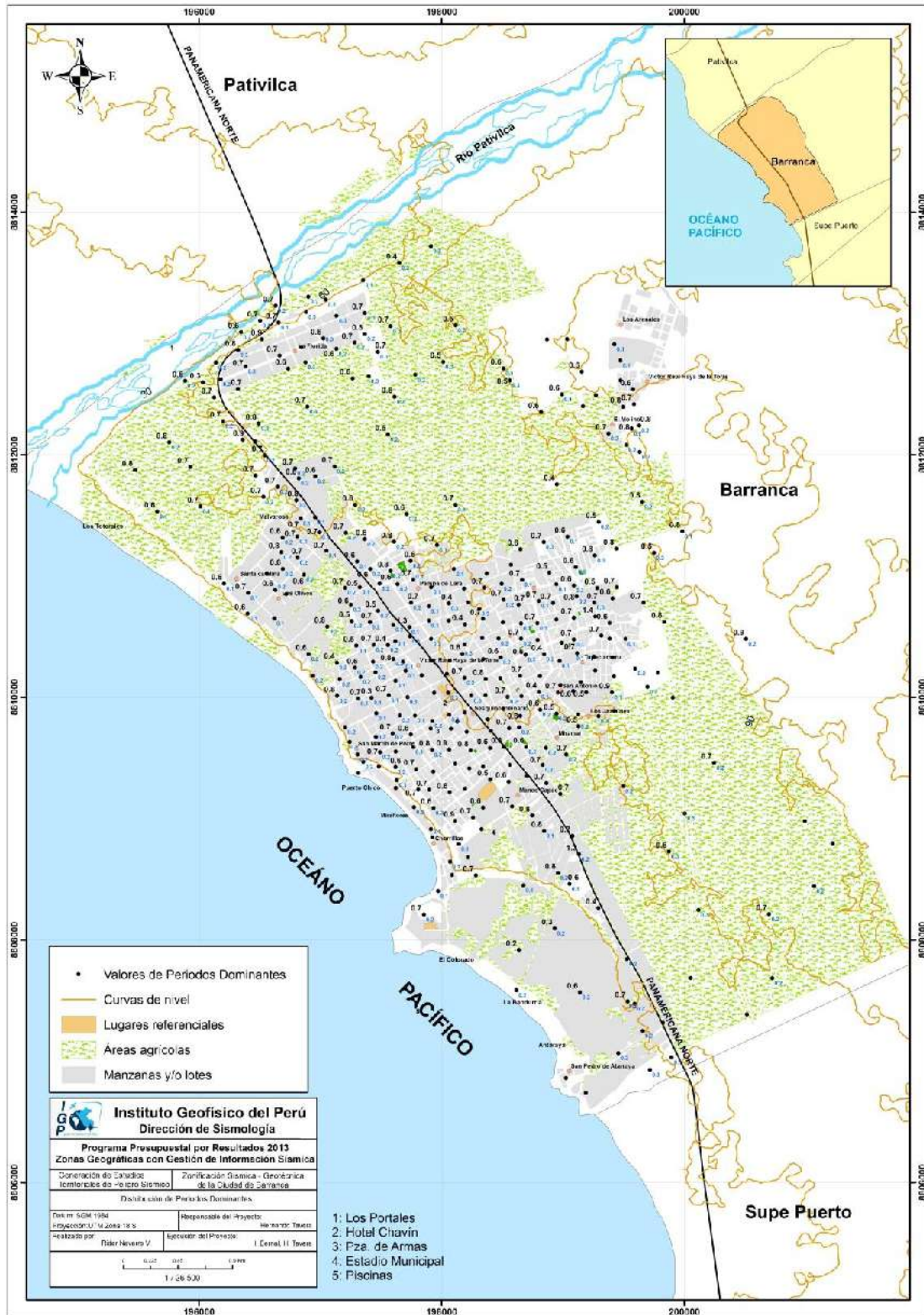


Figura 62: Mapa del área de estudio (ciudad de Barranca) y distribución espacial de los valores de periodos dominantes. La línea discontinua delimita áreas donde predominan periodos de 0.3 segundos.

### 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. La calidad del registro fue verificada en campo y analizada con el software Geopsy 2.8.

En la Figura 63, se presenta el mapa de la ciudad de Barranca con la distribución espacial de 8 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-BRC,.., LR08-BRC. En la Figura 64, 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*

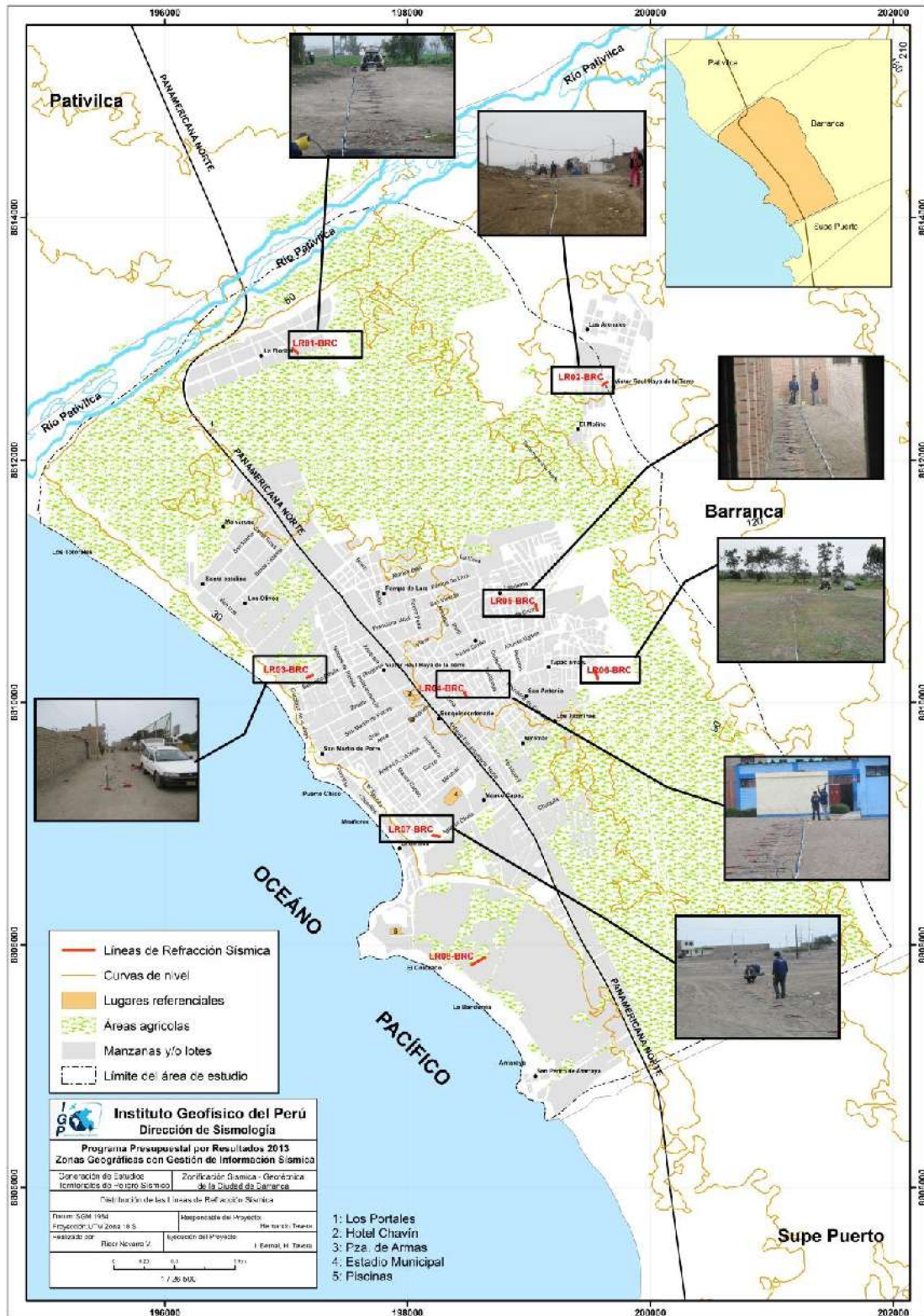


Figura 63: Mapa de la ciudad de Barranca y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-BRC, ..., LR08-BRC.

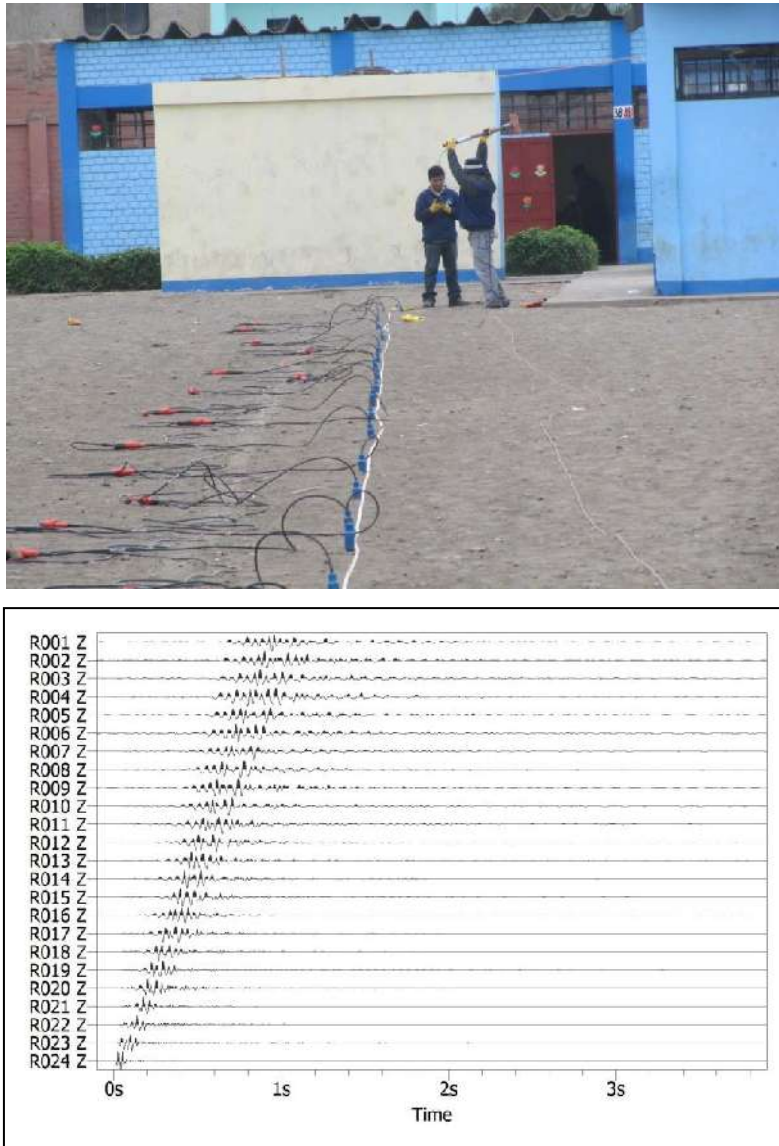


Figura 64: Disposición del equipo de refracción sísmica y registros obtenidos en la ciudad de Barranca

**Arreglo Lineal LR01-BRC:** El arreglo se realizó en el extremo NO de la ciudad de Barranca, Urb. La Florida, próximo al río Pativilca (entre las Avenidas Ancash y Miguel Grau), con una orientación NO-SE. El análisis de la información permitió identificar la presencia de dos capas, la primera con espesores de hasta 8 metros y velocidades  $V_s$  de 320 m/s correspondientes a suelos duros, y una segunda capa con espesores de 30 metros y velocidades  $V_s$  del orden de 490 m/s, correspondiente a suelos relativamente más duros que la primera capa. La

superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 1000 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 65a).

**Arreglo Lineal LR02-BRC:** El arreglo se realizó en el extremo NE de la ciudad de Barranca, Urb. Víctor Raúl Haya de la Torre, con una orientación SO-NE. De acuerdo a su análisis se ha identificado la presencia de una capa con espesores de 11 metros y velocidades  $V_s$  de 430 m/s correspondientes a muy duros. La interface con el semi-espacio tiene velocidades  $V_s$  de hasta 950 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 65b).

**Arreglo Lineal LR03-BRC:** El arreglo se realizó a 500 metros de la línea de costa, entre las avenidas 9 de Diciembre y Berenice Dávila, con una orientación SO-NE. De acuerdo al análisis de la información, se ha identificado la presencia de dos capas, la primera con espesores de 3 metros y velocidades  $V_s$  de 285 m/s correspondientes a suelos duros, y una segunda capa con espesores de 15 metros y velocidades  $V_s$  de 460 m/s, correspondiente a suelos más duros que la primera capa (Figura 65c).

**Arreglo Lineal LR04-BRC:** El arreglo se realizó a ~500 metros de la plaza de Armas de la ciudad de Barranca (en dirección NE), con una orientación NO-SE. El análisis de la información ha permitido identificar la presencia de dos capas, la primera con espesores de 5 metros y velocidades  $V_s$  de 350 m/s correspondientes a suelos duros. Una segunda capa con espesores de 14 metros y velocidades  $V_s$  alrededor de 650 m/s, correspondientes a suelos muy duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de hasta 1000 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 65d).

**Arreglos Lineales LR05-BRC y LR06-BRC:** Estos arreglos fueron realizados en el extremo NE de la zona céntrica de la ciudad de Barranca, ambos separados por 700 metros de distancia y con una orientación NO-SE. En el arreglo LR05-BRC, se identificó la presencia de una capa con espesores de hasta 11 metros y velocidades  $V_s$  de 480 m/s correspondientes a suelos muy duros, similar a lo observado para el arreglo LR02-BRC. Para el arreglo LR06-BRC, se ha identificado la presencia de dos capas, la primera con espesores de 4 metros y velocidades  $V_s$  de 250 m/s y la segunda, con espesores de 10 metros y velocidades  $V_s$  del orden de 350 m/s, correspondiente a suelos duros. La superficie de contacto con la siguiente capa, alcanza velocidades  $V_s$  de 550 m/s correspondiente a suelos muy duros (Figura 65e, Figura 65f)

**Arreglo Lineal LR07-BRC:** El arreglo se realizó en el extremo SO de la zona céntrica de la ciudad de Barranca (Urb. Chorrillos), tomado con una orientación E-O. El análisis de la información permitió identificar la presencia de dos capas, la primera con un espesor de 4 metros y velocidades  $V_s$  de 370 m/s correspondiente a suelos duros. La segunda capa de 14 metros de espesor y velocidades de 700 m/s correspondiente a suelos muy duros o rocas blandas (Figura 65g).

**Arreglo Lineal LR08-BRC:** El arreglo se realizó en el extremo SO de la ciudad de Barranca con una orientación SO-NE. De acuerdo al análisis de la información, se ha identificado la presencia de dos capas, la primera con espesor de 3 metros y velocidades  $V_s$  de 130 m/s correspondiendo a suelos muy blandos. La segunda capa con espesor de 10 metros y velocidades  $V_s$  de 165 m/s correspondientes a suelos blandos. La superficie de contacto con la siguiente capa alcanza velocidades  $V_s$  de 700 m/s y corresponde a rocas moderadamente duras (Figura 65h).

En todos los casos, al realizar la inversión de los modelos de velocidad de ondas  $V_s$  para reconstruir sus frecuencias predominantes, se observa que solo para el arreglo lineal LR07-BRC no existe buena correspondencia con los valores H/V obtenidos en campo, lo cual evidencia la complejidad de los suelos con la posible presencia de capas freáticas.

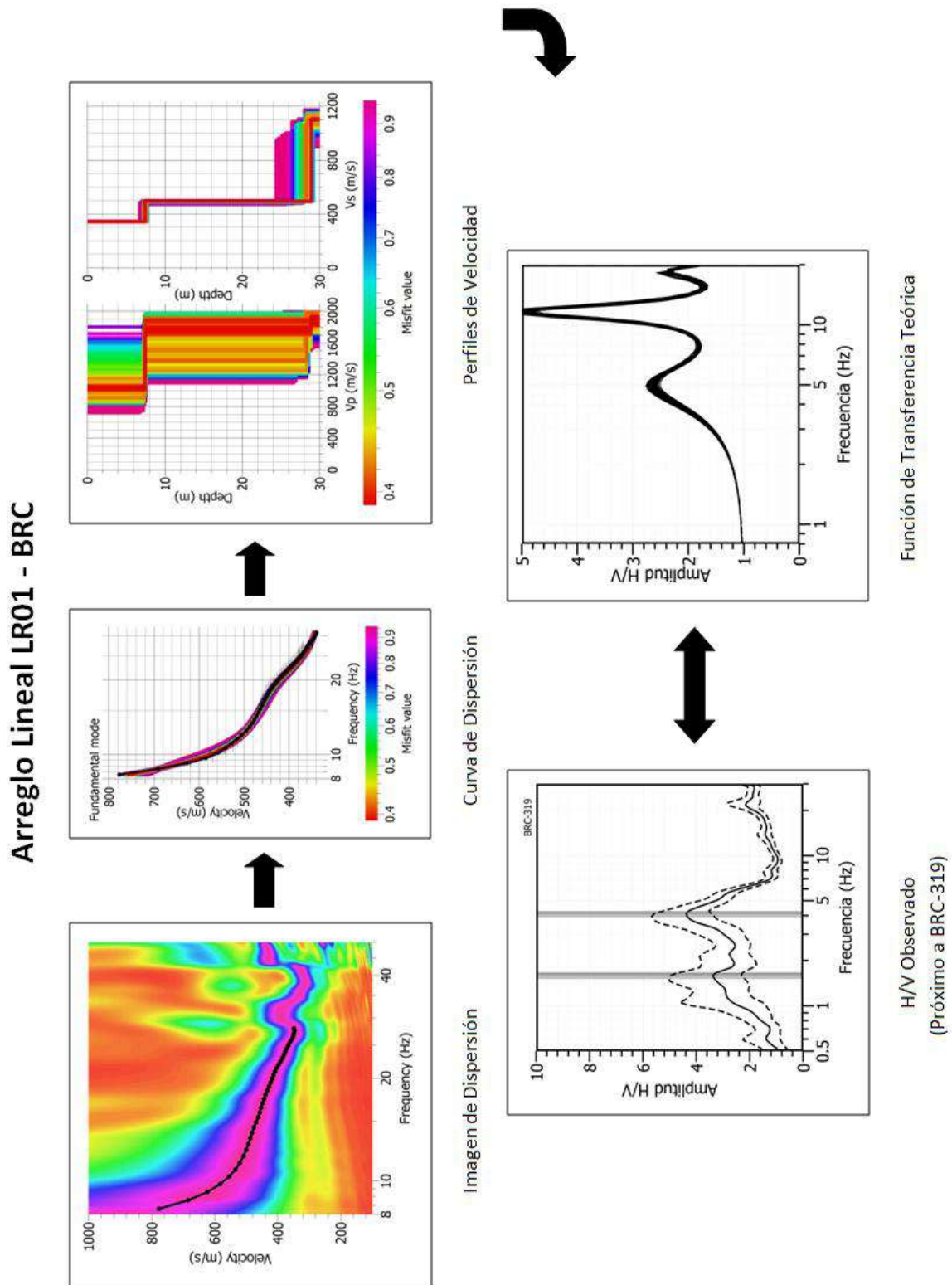


Figura 65: .a) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR01-BRC (ver Figura 63)

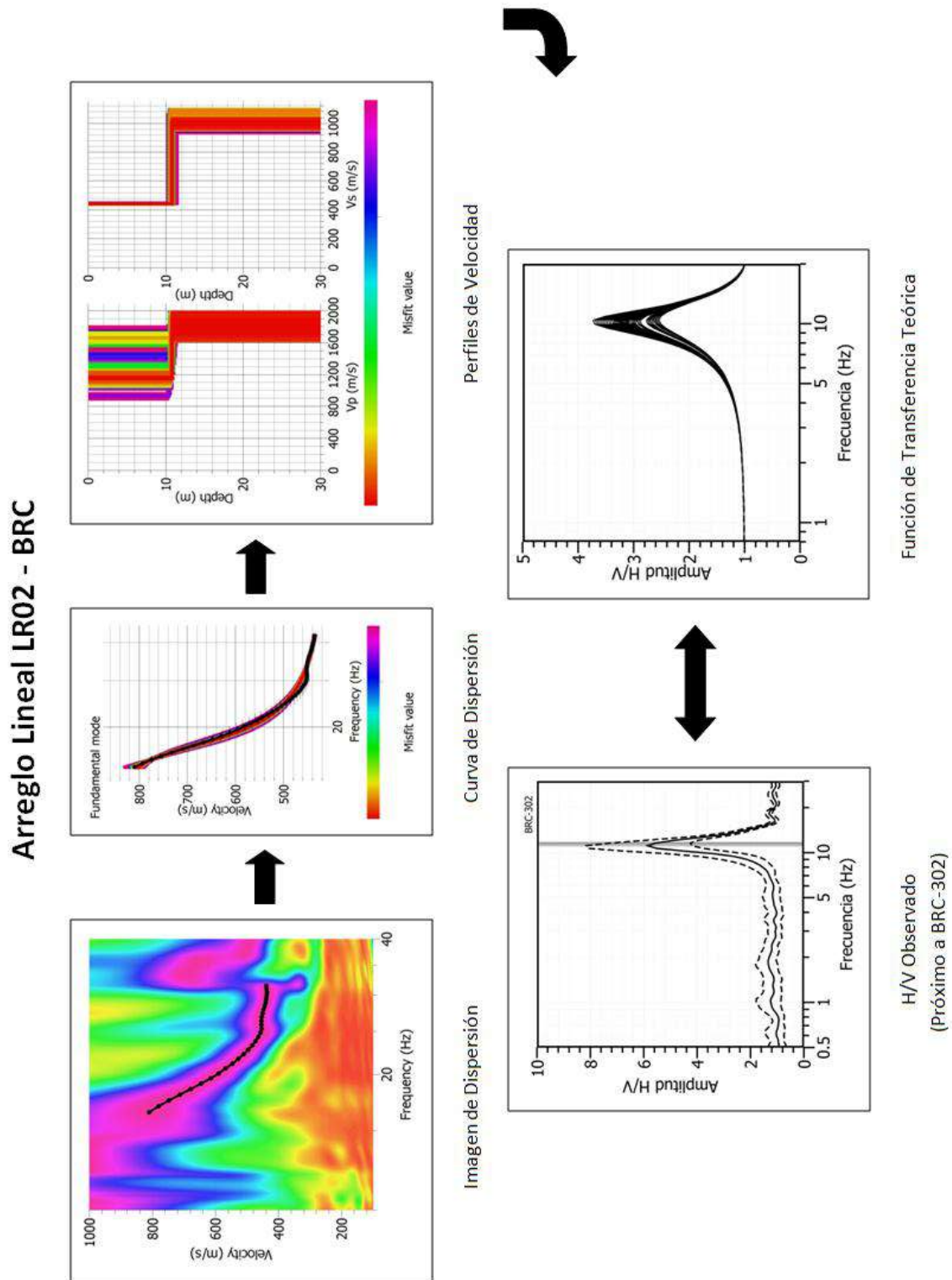


Figura 65: .b) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR02-BRC (ver Figura 63)

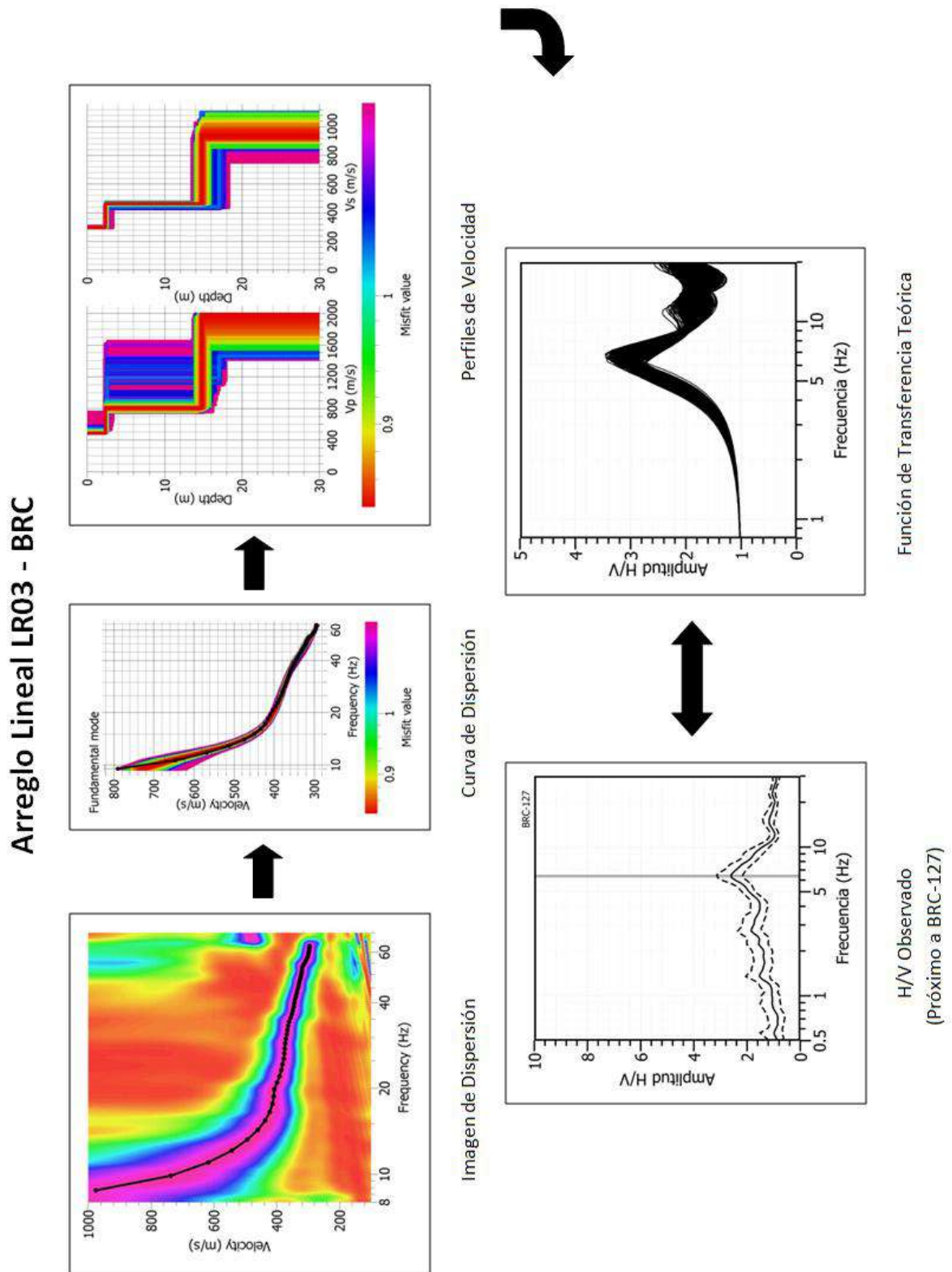


Figura 65.:c) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR03–BRC (ver Figura 63)

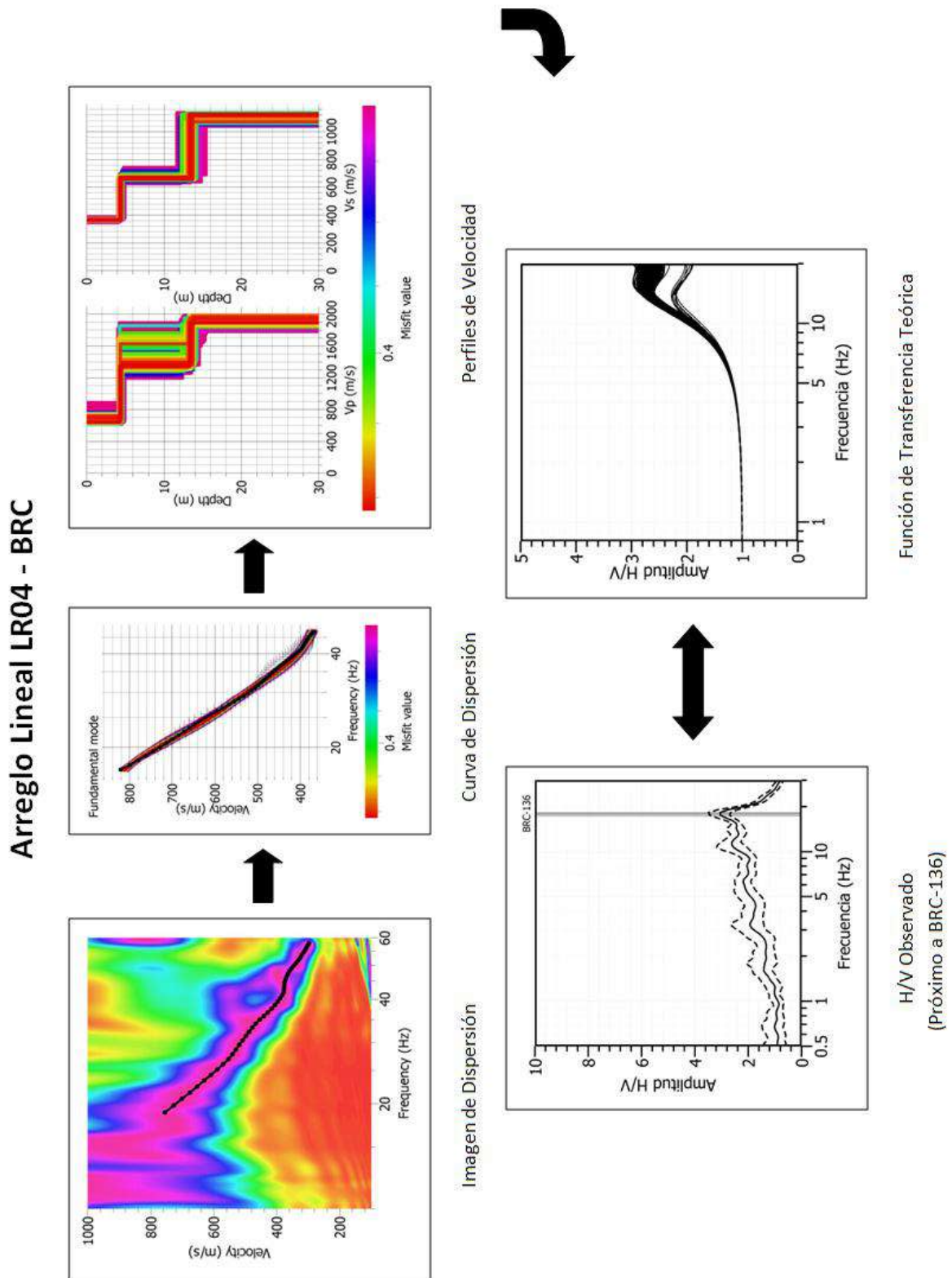


Figura 65: .d) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR04–BRC (ver Figura 63)

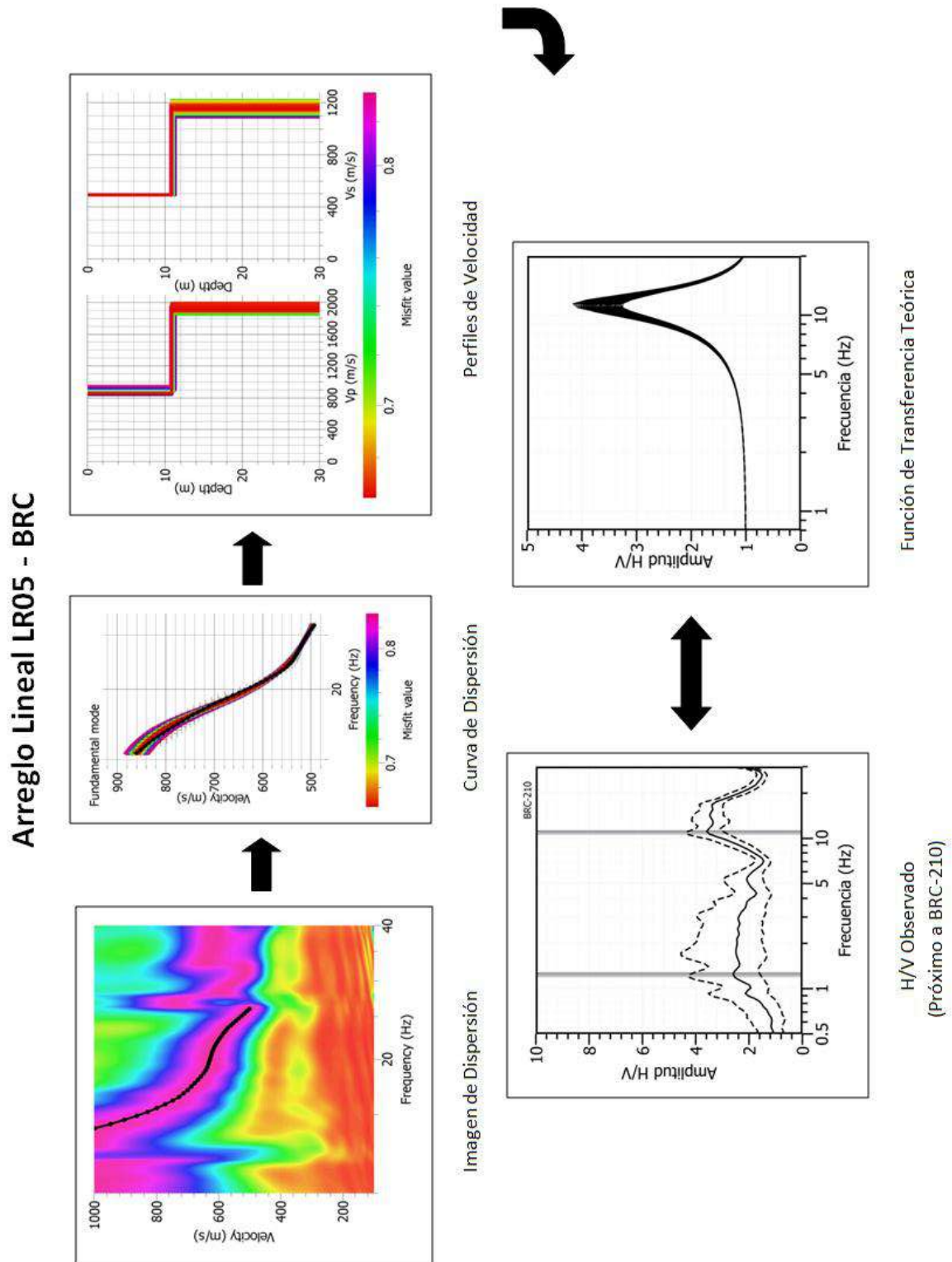


Figura 65.:e) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR05–BRC (ver Figura 63)

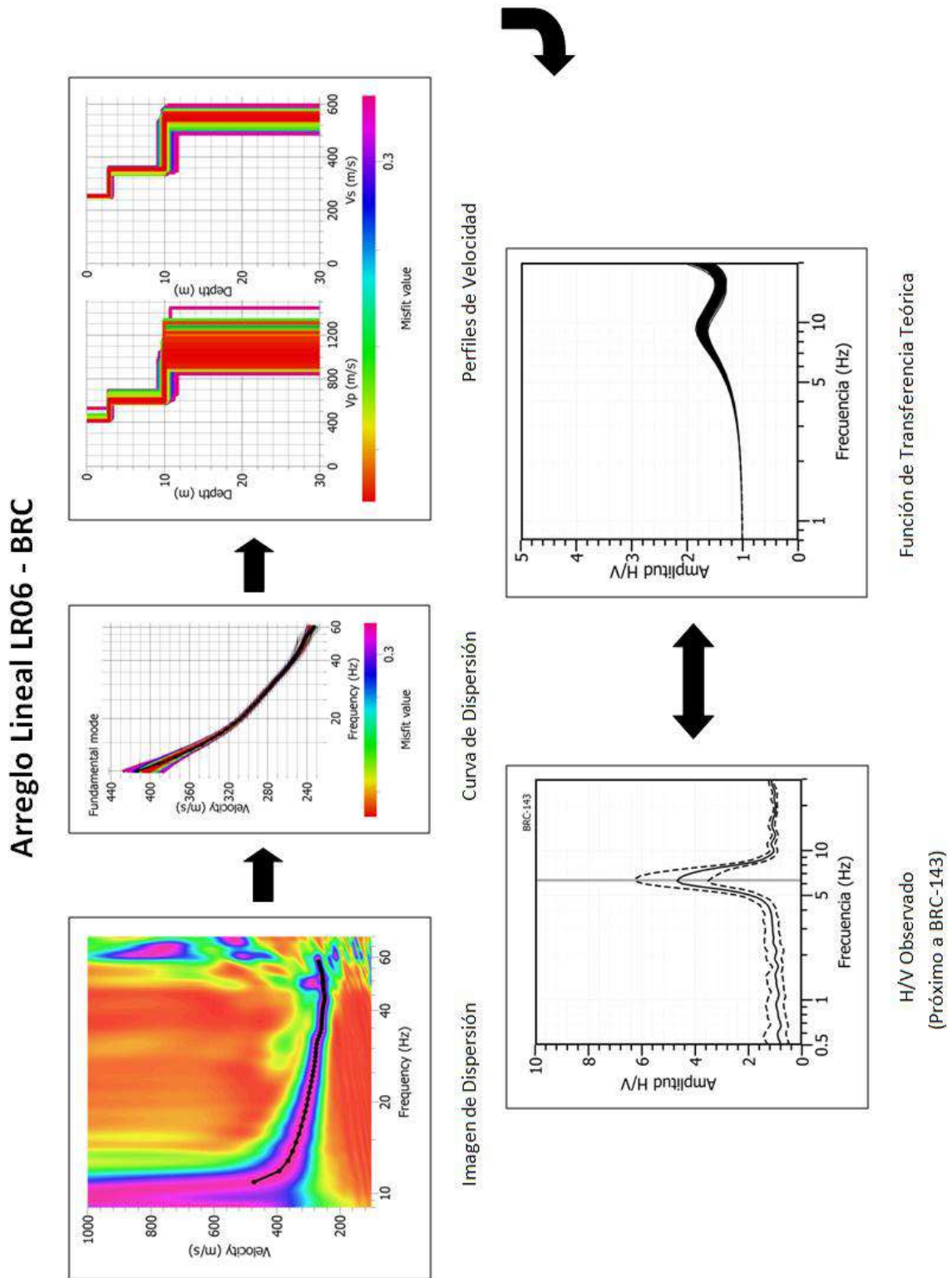


Figura 65.:f) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR06–BRC (ver Figura 63)

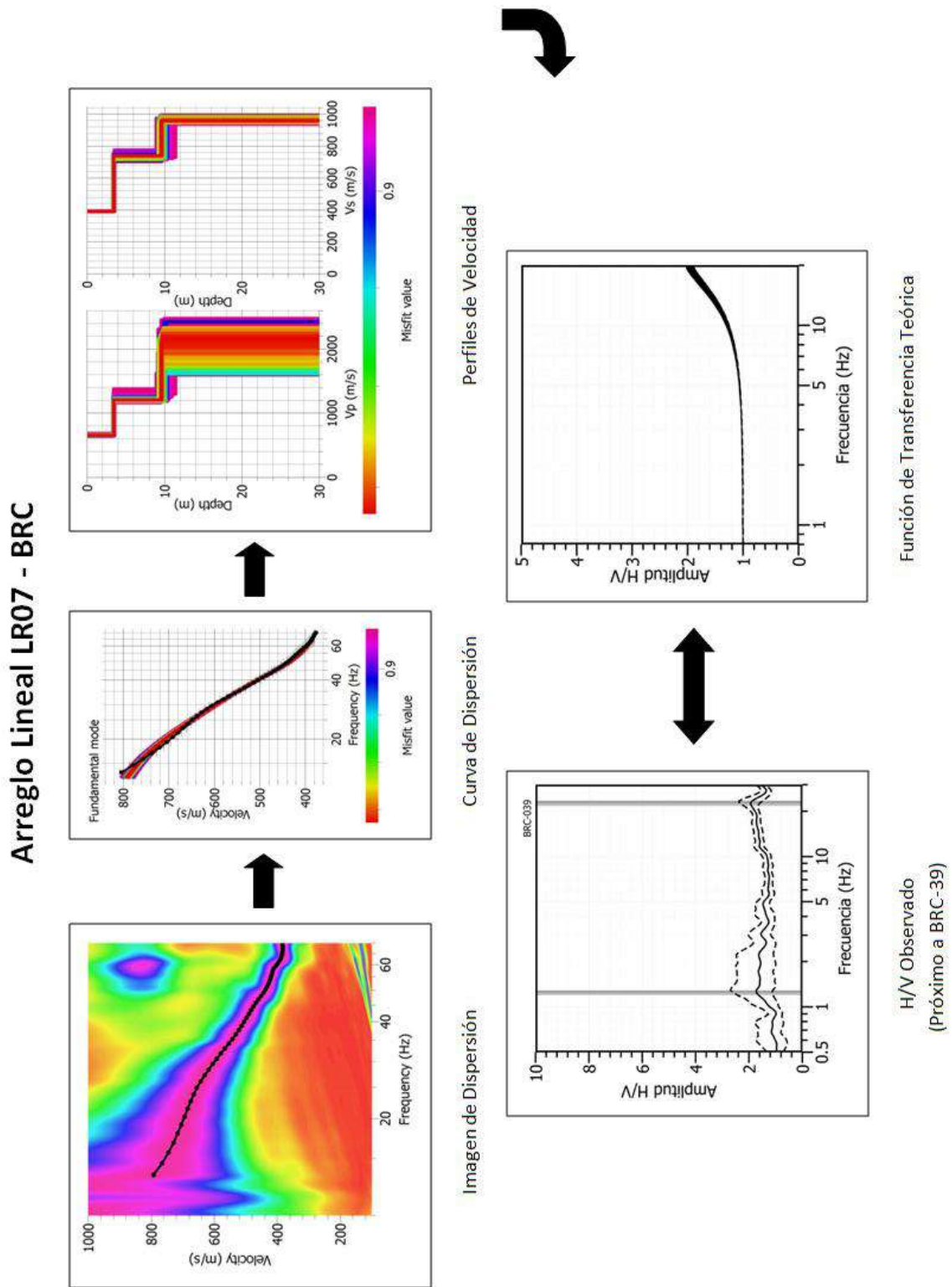


Figura 65.:g) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR07–BRC (ver Figura 63)

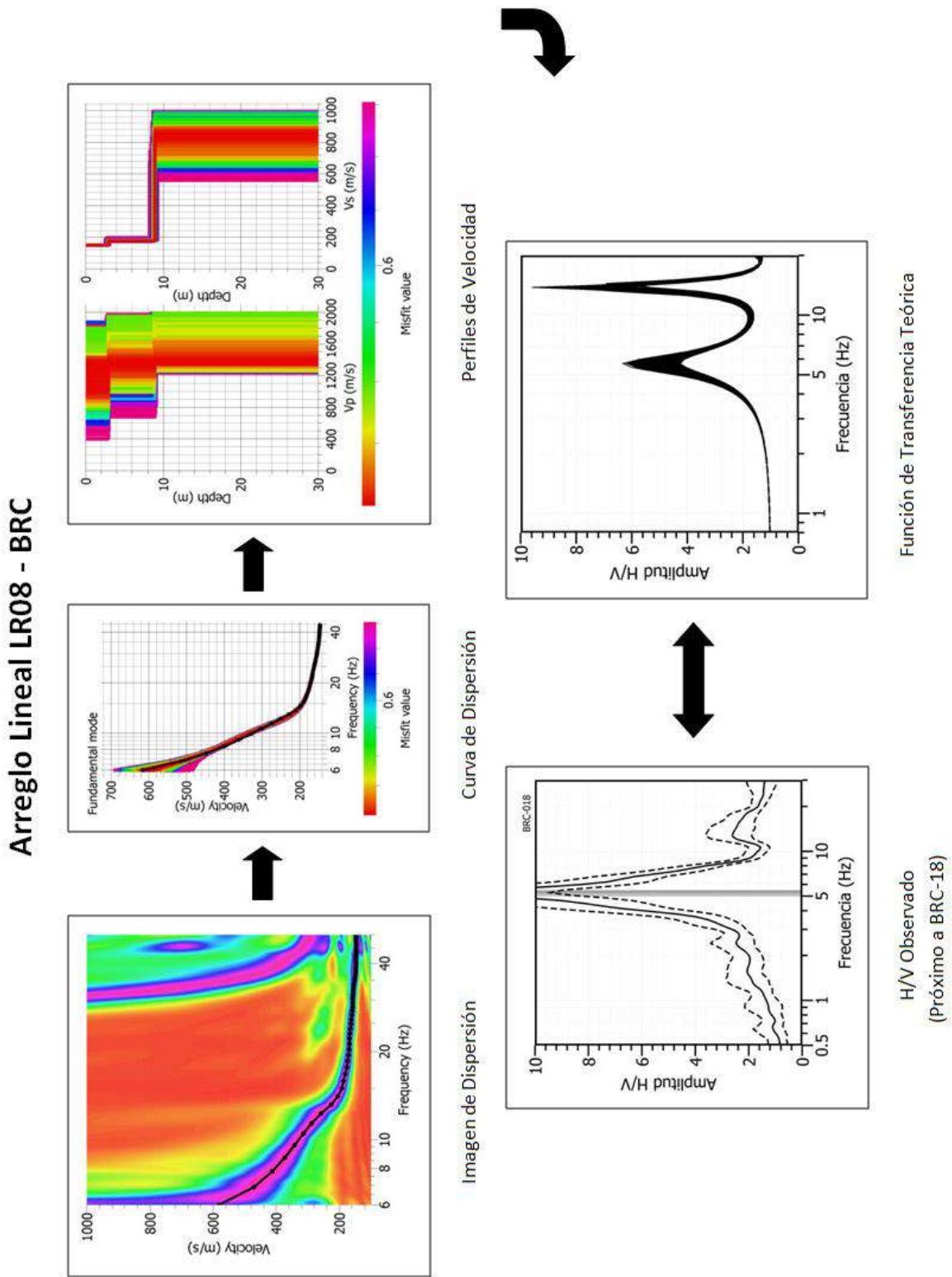


Figura 65.:h) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR08–BRC (ver Figura 63)

Los resultados obtenidos con los arreglos sísmicos lineales permitieron identificar, la presencia de suelos compuestos por dos capas, hacia el extremo Norte (próximo al río Pativilca, Urb. La Florida), la capa más superficial tiene un espesor de 8 metros y velocidades  $V_s$  de 330 m/s y hacia los extremos NO y NE de la plaza de Armas de la ciudad de Barranca, espesores de 2 a 4 metros y velocidades de 250 m/s. En toda la ciudad se tiene una capa más profunda con espesores de 10 a 15 metros y velocidades que fluctúan entre 350 y 490 m/s correspondiendo a suelos duros.

Alrededor de la Plaza de Armas de la ciudad de Barranca, la capa superficial presenta espesores de 5 metros con velocidades de hasta 350 m/s y la segunda, con espesor de 14 metros y velocidades  $V_s$  de 650 m/s. Esta velocidad de ondas  $V_s$  es mayor que el observado en el resto de arreglos lineales. Finalmente, en el extremo SO de la ciudad de Barranca las velocidades  $V_s$  son muy bajas correspondiendo a suelos muy blandos.

#### **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 Barranca se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y cuya distribución se muestra en la Figura 66. 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. 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 67):

*.- Línea de Tomografía Eléctrica LE01-BRC:* Línea realizada en el extremo NO de la ciudad de Barranca y su análisis permite identificar la presencia de suelos con valores de resistividad altos y muy altos (entre 12.23 y 6109.2 ohm.m.), y con el predominio de valores mayores a 500 ohm.m. A niveles superficiales, los suelos presentan valores moderados de resistividad, entre 100 y 500 ohm.m

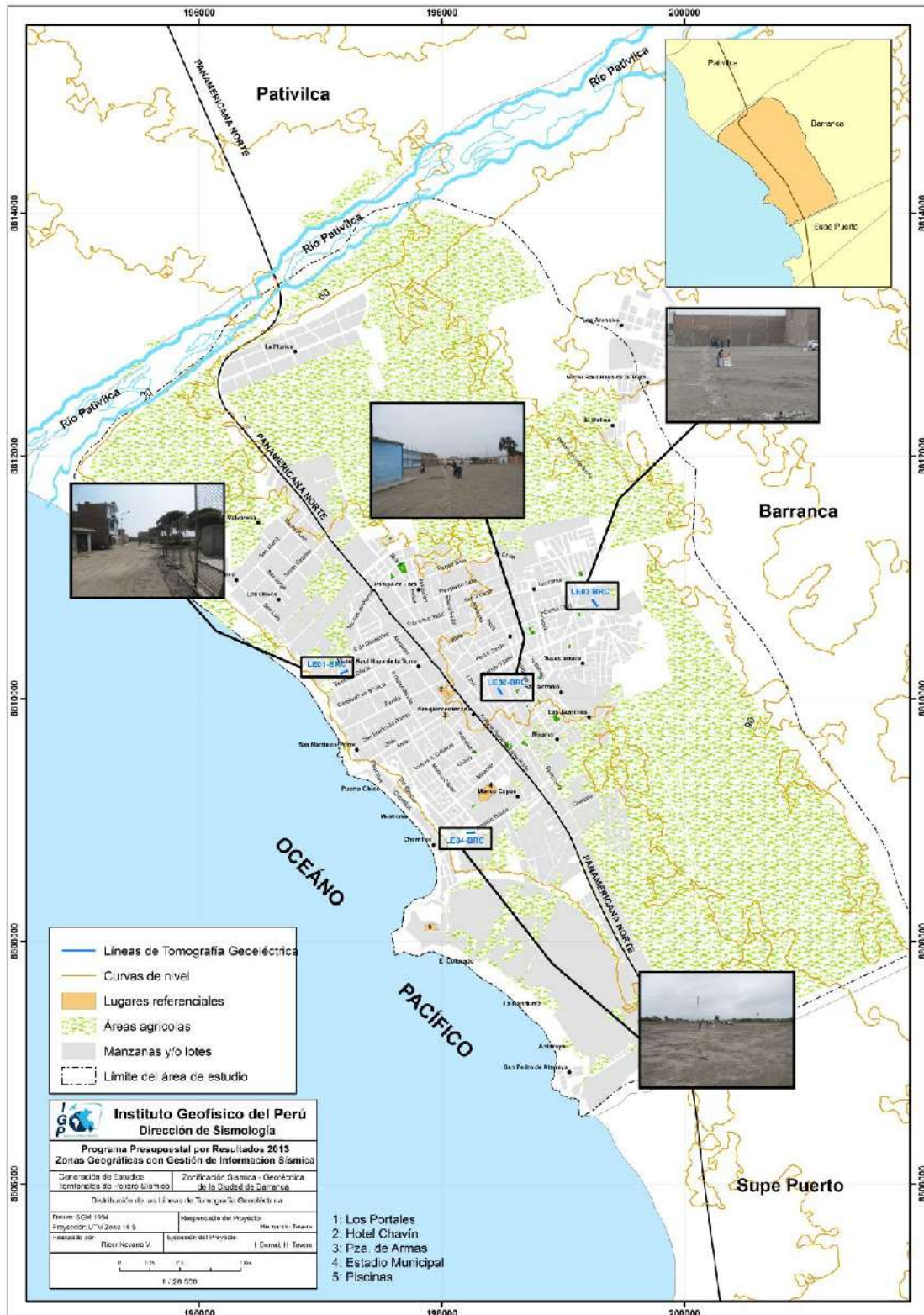


Figura 66: Mapa de la ciudad de Barranca y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica: LE1-BRC, LE2-BRC, LE3-BRC y LE4-BRC

hasta los 4 y 6 m de profundidad, desde el sensor 6 hasta el final de línea. Al inicio de la misma, el suelo es más resistivo, siendo mayores a 1000 ohm.m. Por debajo de los 5 metros, en el subsuelo, aparecen valores más altos que se prolongan hasta el nivel más profundo de la sección, sobre todo entre los sensores 9 y 30. Más allá de este último sensor, los suelos presentan valores altos de resistividad hasta los 7 m de profundidad. A mayor profundidad aparecen valores menores con tendencia a disminuir. Finalmente, en esta sección se identifica la presencia de dos zonas con valores menores a 20 ohm.m, la primera de forma ovalada ubicada en el centro de la sección, entre 10 y 13 m de profundidad; y la segunda hacia el final de la línea, con valores de resistividad mayor a 100 ohm.m.

*Los valores moderados de resistividad en superficie corresponderían a la presencia de materiales finos, siendo posible que los aportes de agua propios del parque (zona verde) permitan que los valores de resistividad sean más bajos en un extremo de la línea. En profundidad los valores se hacen más resistivos y se acentúan al inicio de la línea de tomografía, cerca de la loza deportiva. Del mismo modo, al final de la línea y a mayor profundidad, el suelo presenta valores de resistividad muy bajos, lo cual sugiere que el agua superficial alcanzaría niveles más profundos.*

.- *Línea de Tomografía Eléctrica LE02-BRC:* Línea realizada en la zona céntrica de la ciudad de Barranca (próximo a la Plaza de Armas), se caracteriza por presentar suelos con valores de moderados a altos resistivos, fluctúan entre 45.16 y 4157.4 ohm.m., predominando suelos con valores entre 100 y 500 ohm.m. (Figura 68).

A niveles superficiales, predominan suelos con valores de resistividad entre 100 a 400 ohm.m. hasta una profundidad de 2 m, los valores disminuyen hacia el final de la sección. A mayor profundidad, los suelos presentan valores de resistividad mayor en el rango de 1000 hasta 4000 ohm, distribuidos a lo largo de la línea dentro de una franja que alcanza profundidades entre 2 y 8 metros.

*Los valores de resistividad en superficie son moderados (entre 100 y 500 ohm.m) y debido a la presencia de suelos compuestos por materiales finos. A profundidades entre 2 y 6 metros, los suelos son muy resistivos y podrían*

corresponder a la presencia de bloques de concreto, cuerpos rocosos de gran tamaño o estructuras de concreto, siendo posible ver buzones de agua cerca de la línea.

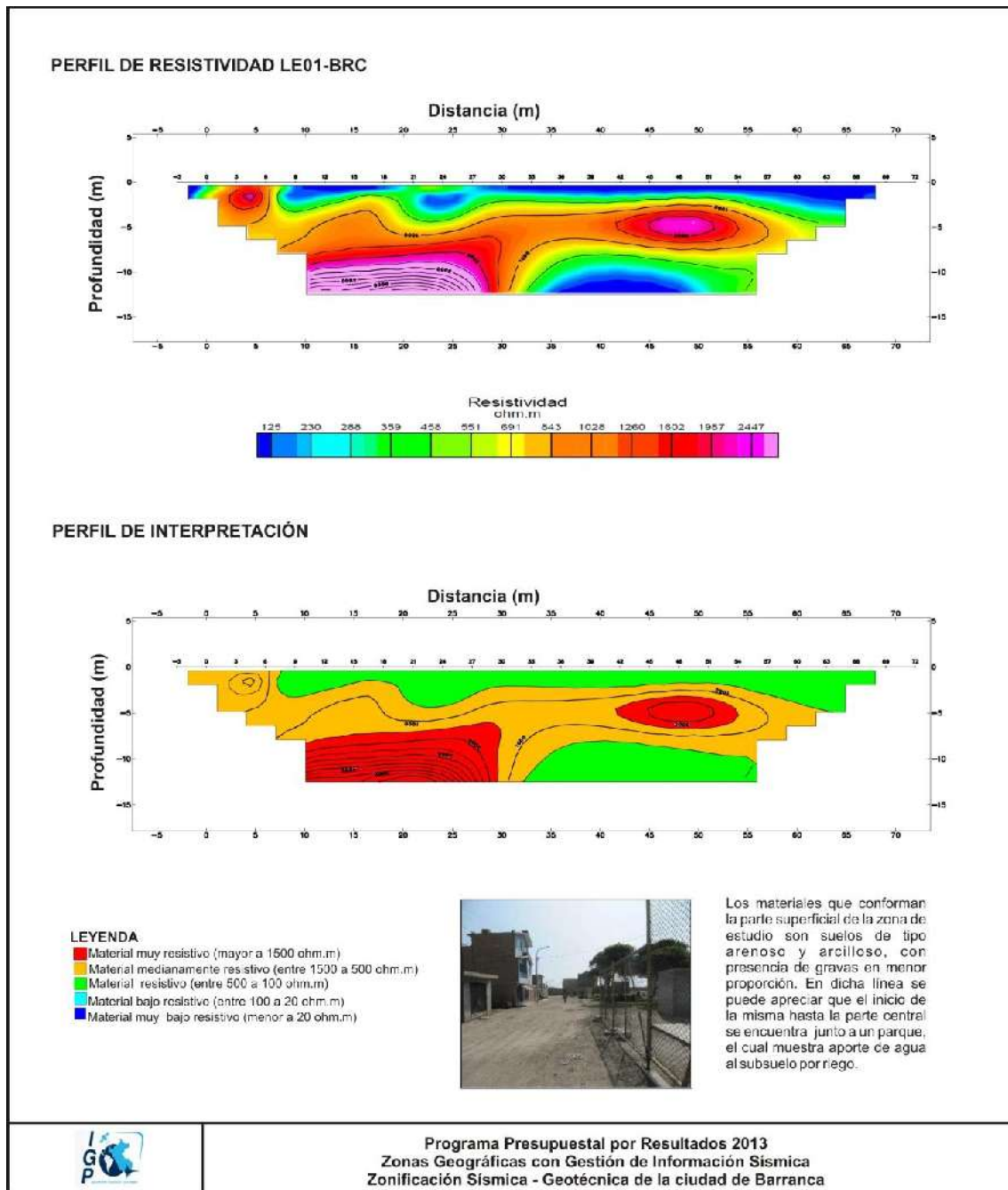


Figura 67: Línea de Tomografía Eléctrica LE01-BRC en el extremo NO de la ciudad de Barranca (ver Figura 66).

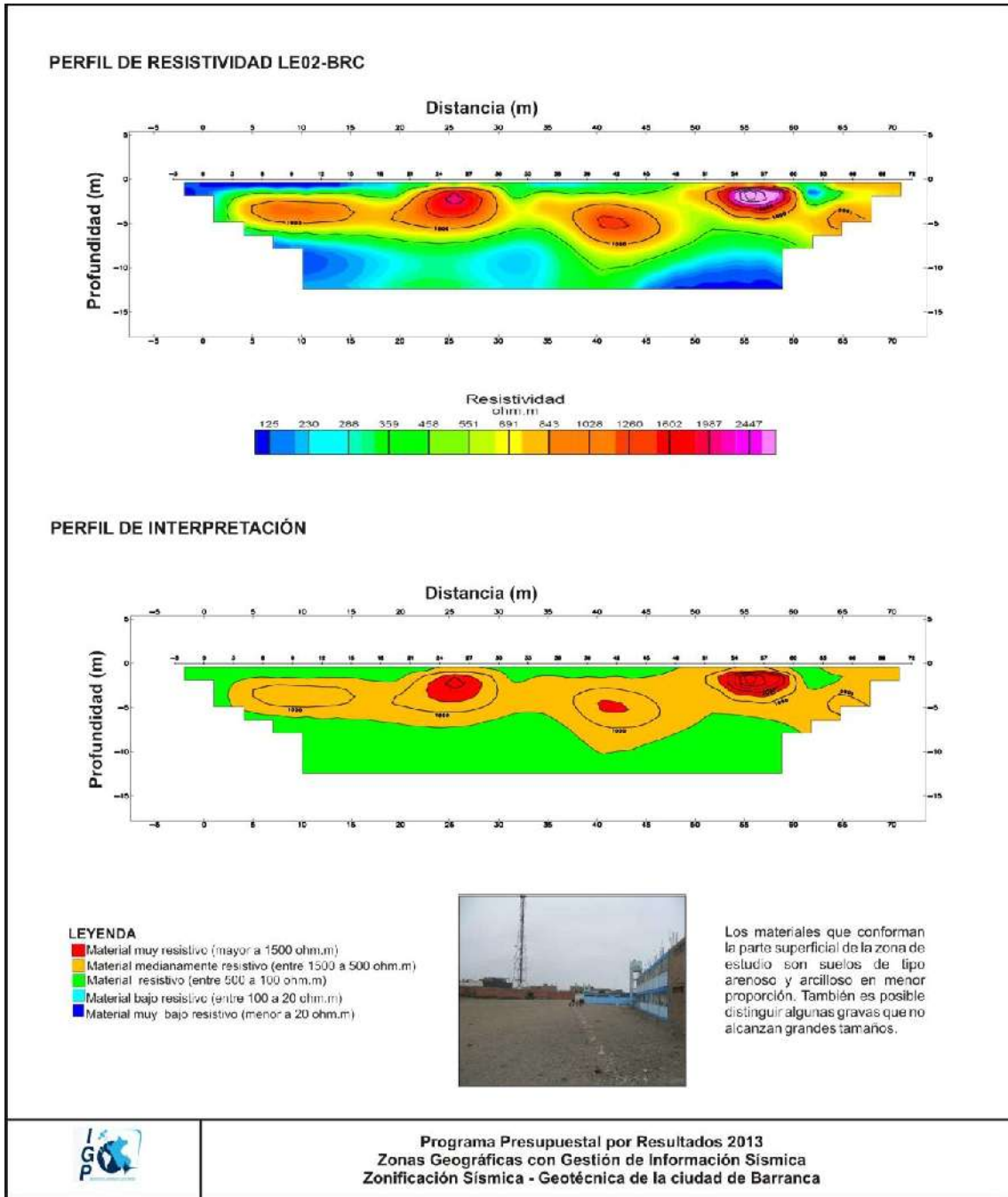


Figura 68: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE02-BRC en la zona céntrica de la ciudad de Barranca (ver Figura 466)

- Línea de Tomografía Eléctrica LE03-BRC: Línea tomada en el extremo NE de la zona céntrica de la ciudad de Barranca y que se caracteriza por considerar suelos con valores moderadamente resistivos que varían entre 96.2 y 1164.6 ohm.m., predominando los valores entre 100 y 500 ohm.m. A niveles superficiales predominan suelos que presentan valores de 100 hasta 300 ohm.m,

hasta una profundidad de 2 m, en el inicio de sección, hasta 5 m al final de la misma. A profundidades de 4.5 m a 8 m se observa la presencia, a manera de una franja semi-inclinada, suelos con valores de resistividad en el rango de 500 a 1000 ohm.m., los mismos que tienen tendencia a bajar a niveles más profundos, hacia el final de la sección. Conforme se tiende a mayor profundidad, estos valores tienden a disminuir (Figura 69).

*Los valores de resistividad en superficie se presentan como moderados, correspondiendo a suelos compuesto por materiales finos (arenas y arcillas). Los suelos con valores altos resistivos se encuentran a profundidades entre 2 y 10 m, pudiendo estar compuesto por bloques de rocas visibles en superficie o roca fracturada o intemperizada, tal como se aprecia cerca de la línea.*

*.- Línea de Tomografía Eléctrica LE04-BRC: Línea tomada en el extremo SO de la zona céntrica de la ciudad de Barranca y se caracteriza por presentar suelos con valores altos a muy altos resistivos, entre 423.5 y 2892.0 ohm.m., predominando los valores de 500 a 1500 ohm.m. A niveles de profundidad de 4 metros, los suelos presentan valores de resistividad moderados entre 500 y 1500 ohm.m. A mayor se aprecia valores de resistividad entre 1500 a 2800 ohm.m., correspondiente a suelos dentro de una franja sub-horizontal. A mayor profundidad, los suelos presentan valores de resistividad entre 500 y 1500 ohm.m. (Figura 70).*

*Los valores de resistividad en superficie son altos (entre 500 y 1500 ohm.m) y corresponden a suelos compuestos por materiales finos (arenas y arcillas secas). A profundidades por debajo de 2 a 4 metros, los suelos presentan valores de resistividad muy altos y podrían corresponder a depósitos de escombros de origen antrópico, debido a que poseen baja consolidación, además de irregular y muy heterogénea disposición de sus materiales. Estos suelos son porosos y se llenan de otros materiales e incluso aire, haciéndolos muy resistivos al paso de la corriente. En campo corresponden a los montículos de este material que se encuentran cerca de la zona de estudio. A mayor profundidad, los suelos son menos resistivos debido a la posible existencia de agua.*

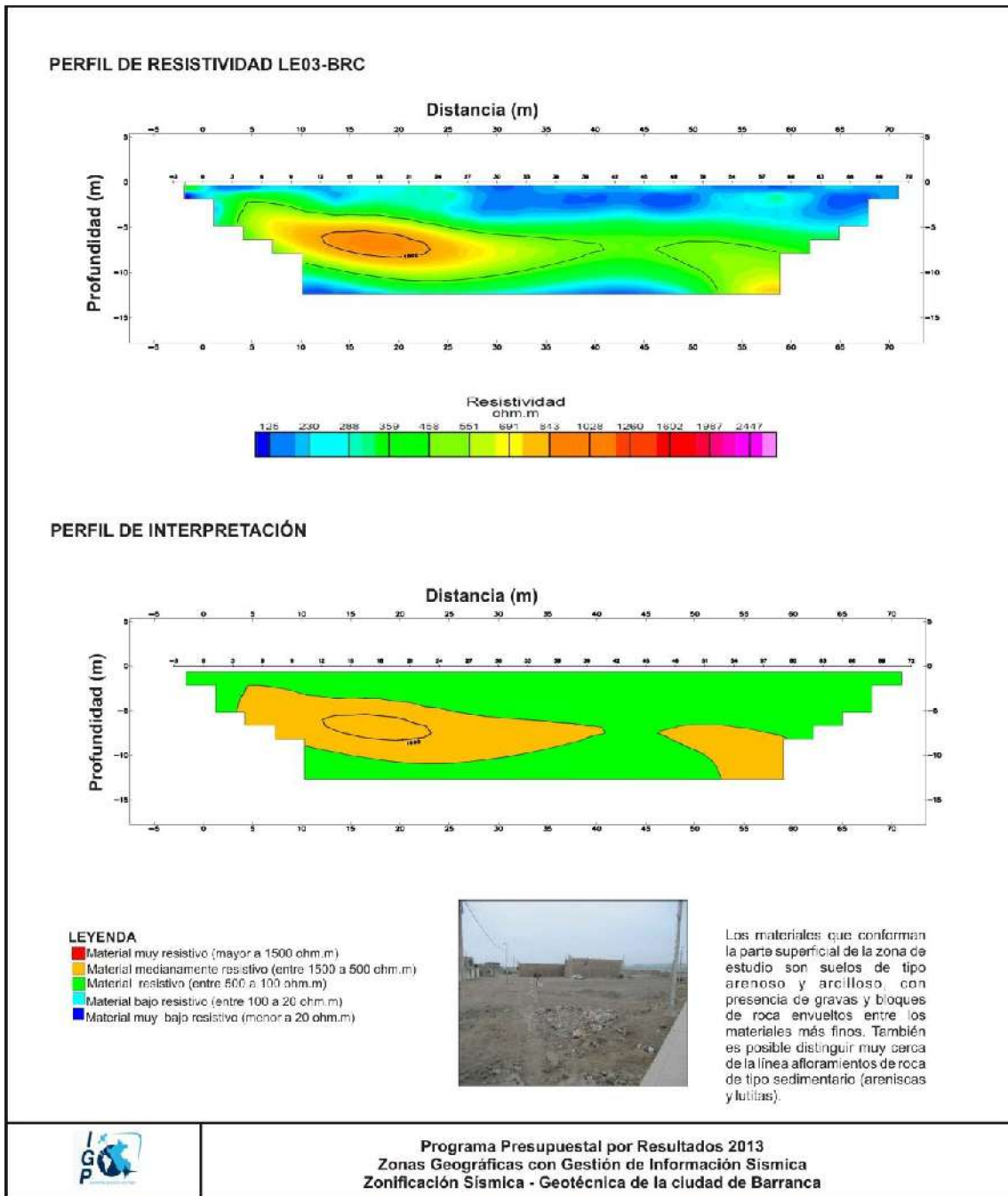


Figura 69: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE03-BRC en el extremo NE de la ciudad de Barranca (ver Figura 66)

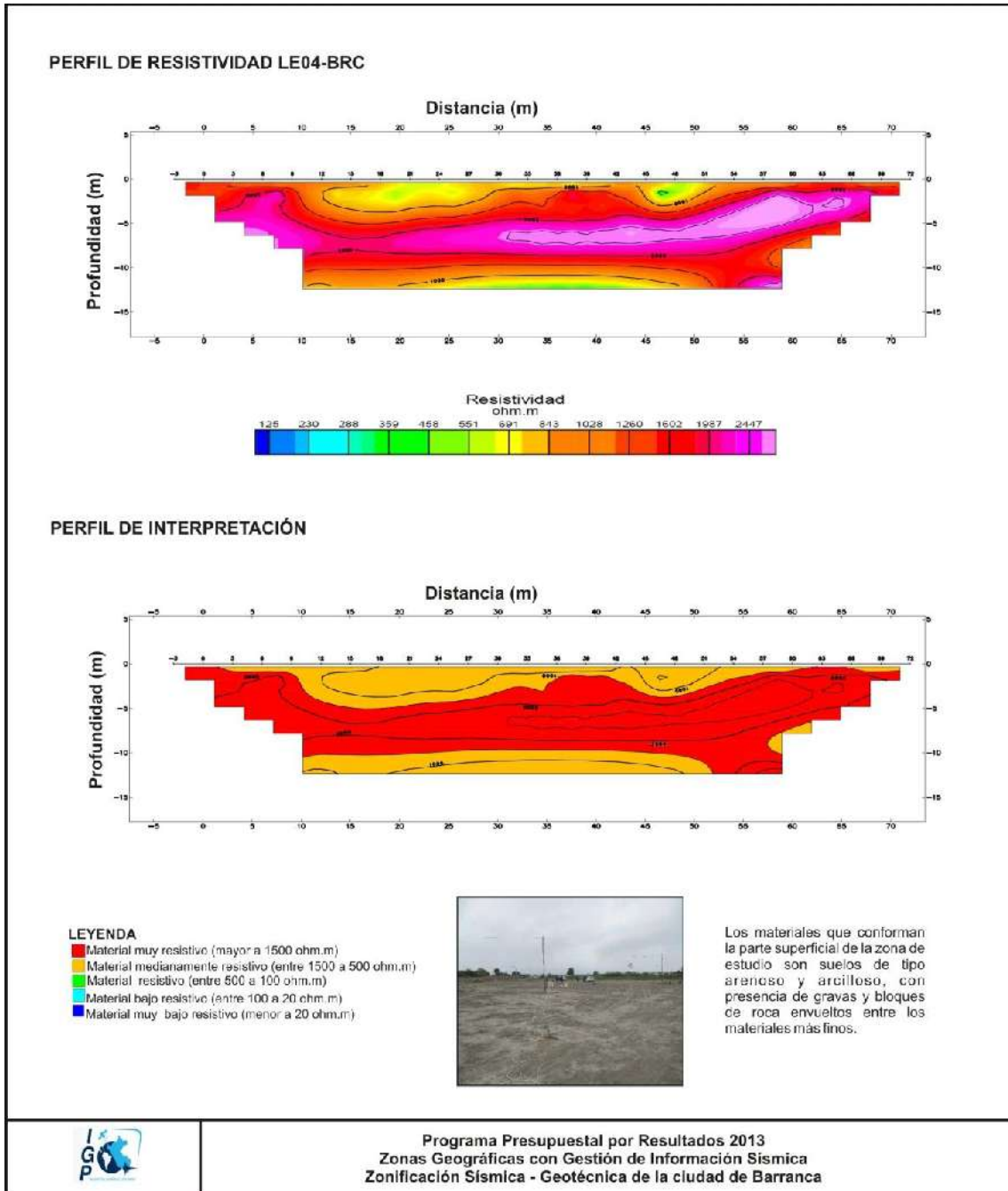


Figura 70: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE04-BRC en el extremo SO de la ciudad de Barranca (ver Figura 66)

Según los resultados obtenidos, la zona de estudio se caracteriza por presentar suelos con resistividades moderadas a muy altas, delimitando dos niveles. En superficie y hasta una profundidad de 2 a 5 metros, predominan suelos con valores moderados de resistividad, entre 100 y 500 ohm.m compuestos por materiales finos. A mayor profundidad, se observa la presencia de suelos que forman una franja sub-

horizontal de valores mayores a 500 ohm.m y que en algunos casos llegan a 1500 ohm.m. Estos valores corresponderían a suelos compuestos por bloques de rocas fracturas y/o depósitos de escombros de origen antrópico.

## 12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

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

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

Para la ciudad de Barranca se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 71):

**ZONA I:** *Conformada por estratos de grava que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos, con velocidades de ondas de corte (Vs30) mayores a los 500 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. Esta zona, presenta sensibilidad en un segundo pico de periodo (0.4 – 0.8 segundos), con menores amplificaciones.*

**ZONA II:** *Se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 8 y 20 metros, subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial. El periodo predominante del terreno es de 0.3 segundos, con velocidades de ondas de corte (Vs30) entre 250 y 400 m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. . Esta zona, presenta sensibilidad en un segundo pico de periodo (0.4 – 0.8 segundos), con menores amplificaciones.*

**ZONA III:** *No identificada en la ciudad de Barranca.*

**ZONA IV:** *Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Esta zona es considerada como caso especial y/o condiciones excepcionales correspondiendo a suelos Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana (Según la Norma E.030).*

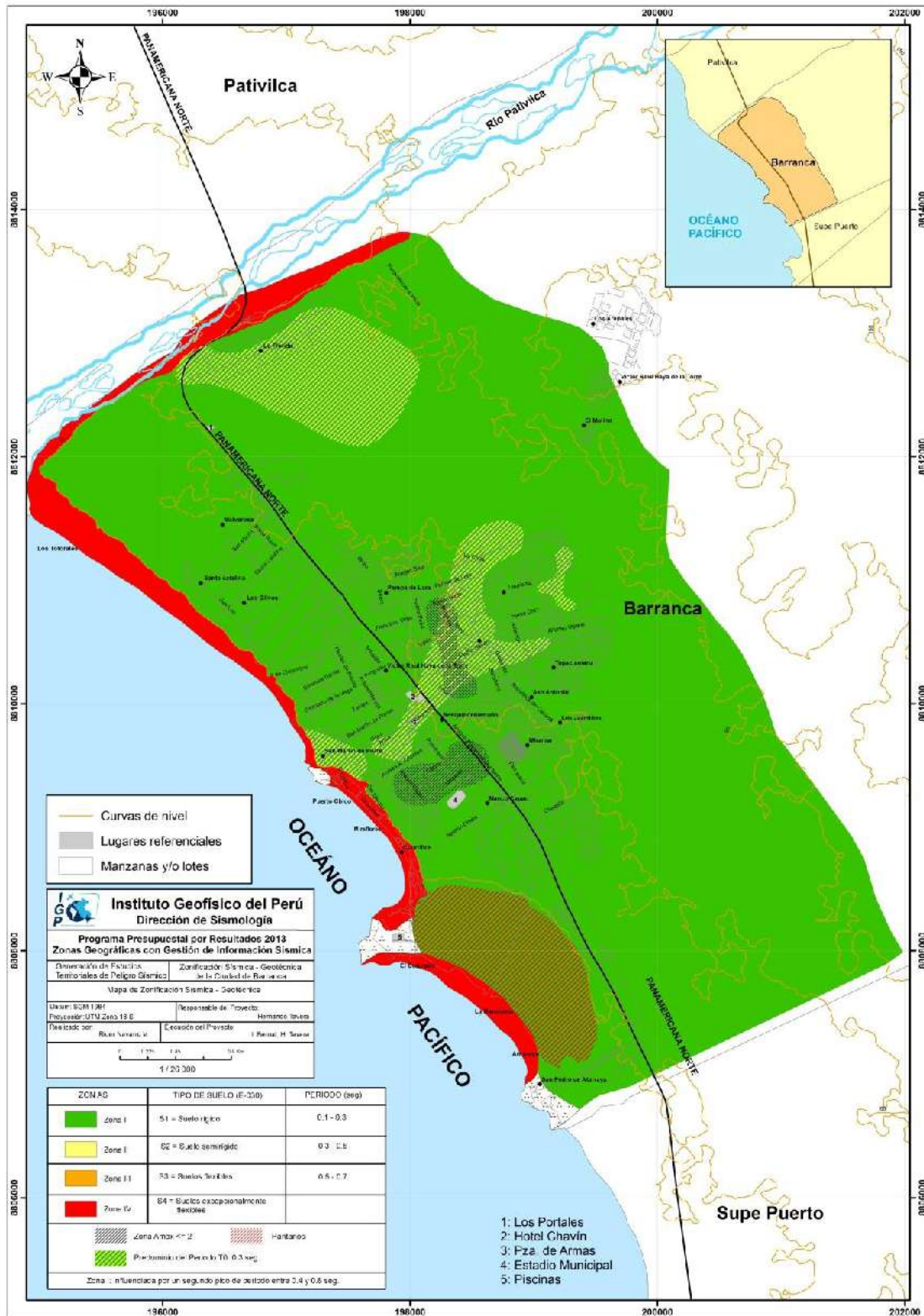


Figura 71: Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica para la ciudad de Barranca

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

### CONCLUSIONES

#### **Aspectos Geomorfológicos**

La ciudad de Barranca se encuentra sobre una llanura aluvial con un desnivel promedio de 25 m.s.n.m. En su extremo este se observa la presencia de montañas con alturas que no sobrepasan los 100 metros, además de terrazas, acantilados marinos y playas.

#### **Aspectos Geológicos:**

La ciudad de barranca se encuentra asentada sobre afloramientos de la Formación Casma constituida por derrames andesíticos de grano fino pertenecientes al Cretáceo Inferior. En esta secuencia se encuentran depósitos del Cuaternario como aluviales, coluviales y eólicos. Otros del Cuaternario Reciente como mezclas de gravas, arenas, limos y arcillas. También se encuentran depósitos fluviales en el cauce del río Pativilca y depósitos marinos en el borde costero. Finalmente, aparecen depósitos antropogénicos generados por la acción del hombre

#### **Aspectos Geodinámicos:**

En la ciudad de Barranca se ha identificado los siguientes eventos geodinámicos: caída de rocas, derrumbes, erosión marina e inundaciones fluviales. A lo largo del litoral se ha identificado niveles freáticos superficiales.

La construcción de escenarios extremos considera un caudal mínimo de inundación de 800 m<sup>3</sup>/seg que afectaría al A.H. Las Palmeras y grandes áreas agrícolas. Es necesaria la construcción de gaviones.

#### **Aspectos Geotécnicos:**

El análisis de suelos ha permitido identificar en la ciudad de barranca, la existencia de cuatro tipos de suelo: GM, grava limosa; SP, arena pobremente

graduada, SM, arena limosa y GP-GM, grava pobremente graduada-grava limosa. El tipo de suelo que predomina en la ciudad de Barranca es del tipo GM con arena cubriendo un 50% de toda el área urbana; mientras que, los SP en un 20% se encuentran cerca del litoral, el SM en los terrenos agrícolas y GM-GP en pequeñas zonas del centro de la ciudad.

En la ciudad de Barranca los suelos que la conforman presentan de baja a media capacidad portante, siendo esta última la correspondiente a los suelos de la mayor parte del área urbana. Baja capacidad portante se tiene en todos los terrenos agrícolas. Para la construcción de cualquier obra de ingeniería es necesario realizar de manera puntual estos estudios geotécnicos.

### **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, sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970 y 1974; aunque de magnitud moderada ( $M_w \sim 7.5$ ), causaron daños en varias ciudades costeras, en el caso de Barranca en viviendas de adobe y quincha.

Estos sismos generaron tsunamis con diferentes características que afectaron a la zona costera. Considerando como escenario la ocurrencia de un sismo de  $M_w=8.5$ , la ola de tsunami llegaría a la zona costera de la ciudad de Barranca en 18 minutos con altura de ola del orden de 6 metros en la bahía de Barranca, produciendo niveles de inundación horizontal hasta distancias de 1.6 km a lo largo del río Pativilca y de 400 metros en las playas Malva Rosa, Bandurria y Atarraya.

### **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 Barranca es heterogéneo. Los valores de frecuencias predominantes sobresalientes han permitido agruparlos en tres rangos, **F<sub>0</sub>** ( $F < 3.0$  Hz), **F<sub>1</sub>** ( $3.0 < F < 10$  Hz) y **F<sub>2</sub>** ( $F > 10$  Hz).

Los valores de  $F_0$ , a pesar que están presentes en casi toda la ciudad, influyen en menor % a la dinámica de los suelos debido a que tienen poca amplificación. En el caso de  $F_1$  predominan en el área de la ciudad de Barranca con valores de 3 a 5 Hz, siendo mayoría en proximidades del río Pativilca y en extremo Este de la ciudad. En cuanto a amplificaciones, estas se incrementan conforme se avanza hacia la línea de costa. Finalmente,  $F_2$  se concentra en el extremo Este de la ciudad con amplificaciones de hasta 6 veces. Los valores de  **$F_0$ ,  $F_1$  y  $F_2$**  caracterizan a los sustratos más profundo, superficial y más superficial, siendo este último de menor espesor con respecto al primero.

**Los estudios con arreglos sísmicos lineales** han permitido identificar en la ciudad de Barranca, la presencia de suelos formados por dos capas. Hacia el extremo norte de la ciudad (río Pativilca y Urb. La Florida), la capa superficial presenta un espesor de 8 metros con velocidades  $V_s$  de 330 m/s. En los extremos NO y NE de la plaza de Armas de la ciudad de Barranca, los suelos presentan capas de 2 a 4 metros y velocidades  $V_s$  de 250 m/s. La segunda capa presenta espesores de 10 y 15 metros con velocidades  $V_s$  de 350 a 490 m/s correspondiendo a suelos duros. Hacia el extremo SO del área de estudio, las velocidades encontradas son bajas correspondiendo a suelos muy blandos.

**La distribución de periodos dominantes** muestra que los periodos mayores varían principalmente entre 0.5 y 0.8 segundos, y los menores entre 0.1 y 0.3 segundos, todos distribuidos de manera casi uniforme sobre toda el área de estudio. En áreas pequeñas ubicadas al NO y Este de la Plaza de Armas de la ciudad de Barranca y al NO del estadio, no se observa valores de periodos dominantes. Los periodos mayores sugieren la presencia de suelos de gran espesor y los menores de poco espesor, donde la primera influye en el comportamiento dinámico de la segunda. Los valores de periodos entre 0.3 y 0.4 segundos se concentran en la parte central de la ciudad siguiendo una orientación Este-Oeste otra próxima al río Pativilca, lo cual permite inferir la presencia de una capa superficial de suelos de mayor espesor con respecto al resto del área de estudio.

**Los estudios de Tomografía Eléctrica** muestran que la zona de estudio se caracteriza por presentar resistividades moderadas a muy altas y delimitan dos niveles. El primer nivel considera profundidades de 2 a 5 metros y los suelos

presentan valores moderados de resistividad (entre 100 y 500 ohm.m) correspondiendo a materiales finos. A mayor profundidad, se aprecia una franja de suelos con valores altos de resistividad (entre 500 a 1500 ohm.m.) compuestos por bloques de roca fracturada y/o depósitos de escombros de origen antrópico.

### **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 Barranca, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de 3 zonas sísmicas - geotécnicas, las mismas que corresponden a suelos de Tipo S1, S2 y S4. Esta clasificación permite proponer, en este estudio, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del suelo) de la ciudad de Barranca.

## **RECOMENDACIONES**

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

## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A., Egozcue y A. Ugalde (1999): Determinación de características dinámicas del suelo a partir de microtremores. Memorias del Primer Congreso de Ingeniería Sísmica, España.
- APESSEG (2005): Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao, CISMID, 10 pag.
- Aki, K., (1957): Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors. 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
- Pierre-Yves BARD y SESAME participants (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.
- Dorbath, L., Cistermas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576

- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects. *Journal of Seismology*, **7**, 449-467
- 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
- 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.
- Nakamura, Y., (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI*, **30**, No.1,25-33 pp.
- Norma E-30 (2003): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, **1**, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- PNUD (2010).: Riesgo sísmico y medidas de reducción del riesgo en Lima. PNUD, INDECI, Proyecto N° 00058530
- Sadigh, K., C. Chang, J. Egan, F. Makdisi, R. Young (1997): Attenuation relationship for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion Data, *Seis. Res. Lett.*, **V-68**, N-1, January/February.
- Santacana, N. (2001): Análisis de susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de

sistemas de información geográfico. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña

- Silgado, E. (1978): Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú entre 1513 y 1974. Instituto Geológico Minero del Perú, Lima, Perú, 120 pag.
- Tavera, H., Buforn, E. (2001): Source mechanism of earthquakes in Peru. Journal of Seismology 5: 519–539, 2001.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Callao (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010): Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPI-IRD.
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C. (2012): Propuesta del mapa de Peligro Sísmico para el Perú. Sismología, IGP.
- 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