

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

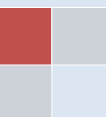
Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico



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

Responsable: Hernando Tavera

**Lima – Perú
2014**



**ZONIFICACIÓN SÍSMICA – GEOTÉCNICA
DE LA CIUDAD DE HUARMEY**
Provincia de Huarmey – Departamento de Ancash

(Comportamiento Dinámico del Suelo)

Responsable del Proyecto: Hernando Tavera

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

Análisis e Interpretación: ¹Eliana Vizcarra
¹Dario Dueñas
²Robert Carrillo

Software SIG: ¹Rider Navarro
²Robert Carrillo

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

Sismología: Patricia Guardia
Cristóbal Condori

Simulación Tsunamis: Julio Martínez

¹Sísmica y Geofísica

²Geología 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 Huarmey, Provincia de Huarmey, Departamento de Ancash. El estudio permite conocer el Comportamiento Dinámico del Suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Asimismo, se propone los posibles escenarios a presentarse ante la ocurrencia de inundaciones por crecidas del río Huarmey y por tsunamis.

Los resultados obtenidos para la Ciudad de Huarmey han permitido identificar, según el procedimiento establecido en la Norma E.030, la existencia de cuatro (4) zonas sísmicas-geotécnicas correspondientes a suelos Tipo S1, S2, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Huarmey 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.- 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: Descripción y 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):

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



Figura 1: Plaza de Armas de la Ciudad de Huarmey

3.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Los orígenes de la ciudad de Huarmey se remontan a los 1000 años a.C. como parte de la cultura Chavín y después del Siglo XIV del imperio Chimú, para luego en el año 1470 integrarse al Imperio Inca. Después de la invasión Española, Huarmey se une al corregimiento del Santa (año 1576) y luego el Libertador San Martín, en el año 1882, lo convierte en Distrito (D.L. N° 862) y en 1836, el Presidente Santa Cruz lo confirma como parte de la Provincia del Santa, departamento de Huaylas. En 1857 fue creado legalmente por D.L. 662 y el Presidente José Pardo la elevo a la categoría de Villa en 1907, para luego en el año 1955 volver a denominarse Distrito. El 20 de diciembre de 1984, Huarmey se convirtió en Provincia durante el Gobierno del Arq. F. Belaunde Terry.



Figura 2: Ubicación geográfica de la ciudad de Huarmey, distrito y provincia del mismo nombre, Región de Ancash.

En la actualidad, **Huarney** es una ciudad del centro-noroeste del Perú, capital de la provincia homónima (Región Ancash), ubicado a 297.70 km de Lima, a orillas del Río Huarney, frente al litoral peruano (Figura 2). La ciudad de Huarney tiene una superficie de 2,899.76 km² y una población de 27,775 habitantes según datos del INEI. El clima de la ciudad es templado y húmedo con temperaturas promedio de 12°C y 28°C, pudiendo llegar en verano a un máximo de 35°C; es decir, veranos calurosos.

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.

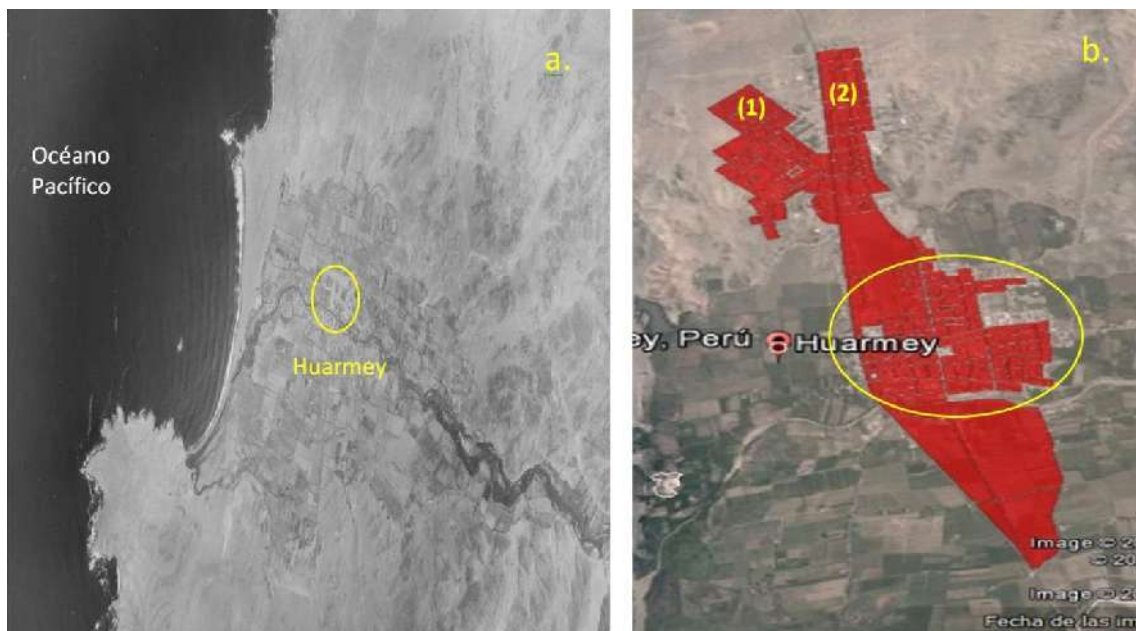


Figura 3: a) Imagen de la ciudad de Huarney en el año 1961, área total 0.50 km², b) Mapa catastral actual de la ciudad de Huarney, área total 3.33 km². (1) La Victoria y (2) Miramar (Fuente: M. de Huarney, 2000)

Para la ciudad de Huarmey, el análisis multitemporal, se realizó en base a fotografías aéreas del año 1961 (Instituto Geográfico Nacional), mapa catastral de la ciudad del año 2000 (Municipalidad de Huarmey) e imágenes en tiempo real del servidor Digital Globe.

En la Figura 3a, se muestra el área poblada de la ciudad de Huarmey en el año 1961 y en la Figura 3b, el mapa catastral actual, observándose por comparación, que en los últimos 52 años, la ciudad de Huarmey se extendió principalmente hacia el sector norte con los A.H La Victoria y Miramar.

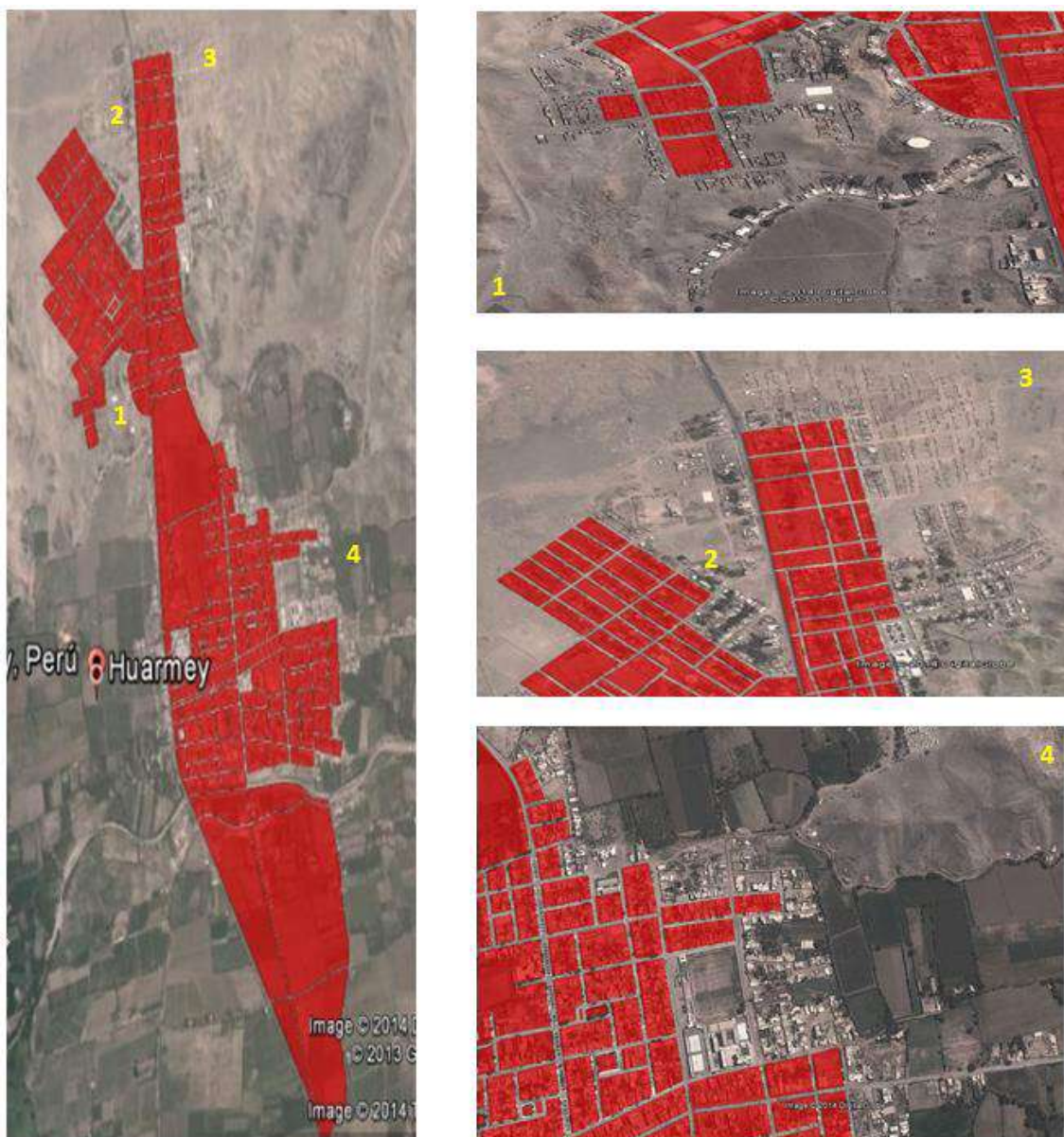


Figura 4: Mapa catastral actual de la ciudad de Huarmey sobrepuesto en imágenes de Google Earth. Para los números, ver texto.

En la Figura 4 se ha superpuesto el actual mapa catastral de la ciudad de Huarmey sobre imágenes de Google Earth (2013), observándose que el desarrollo urbanístico en el extremo NE de la ciudad ocupa zonas de topografía plana (3 en la Figura 4), y hacia el este zonas agrícolas (4 en la Figura 4). Del mismo modo, se observa que en el extremo norte se han producido invasiones sobre la unidad geomorfológica denominada penillanura (2 en la Figura 4).

El presente escenario de expansión urbana de la ciudad de Huarmey, sin la debida planificación, incrementa su vulnerabilidad ante la posible ocurrencia de peligros naturales como los sismos, tsunamis, licuación de suelos, inundaciones y deslizamientos. En tal sentido, es imperativo disponer de documentos técnicos que ayuden a la correcta gestión del riesgo como primera medida preventiva.

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.

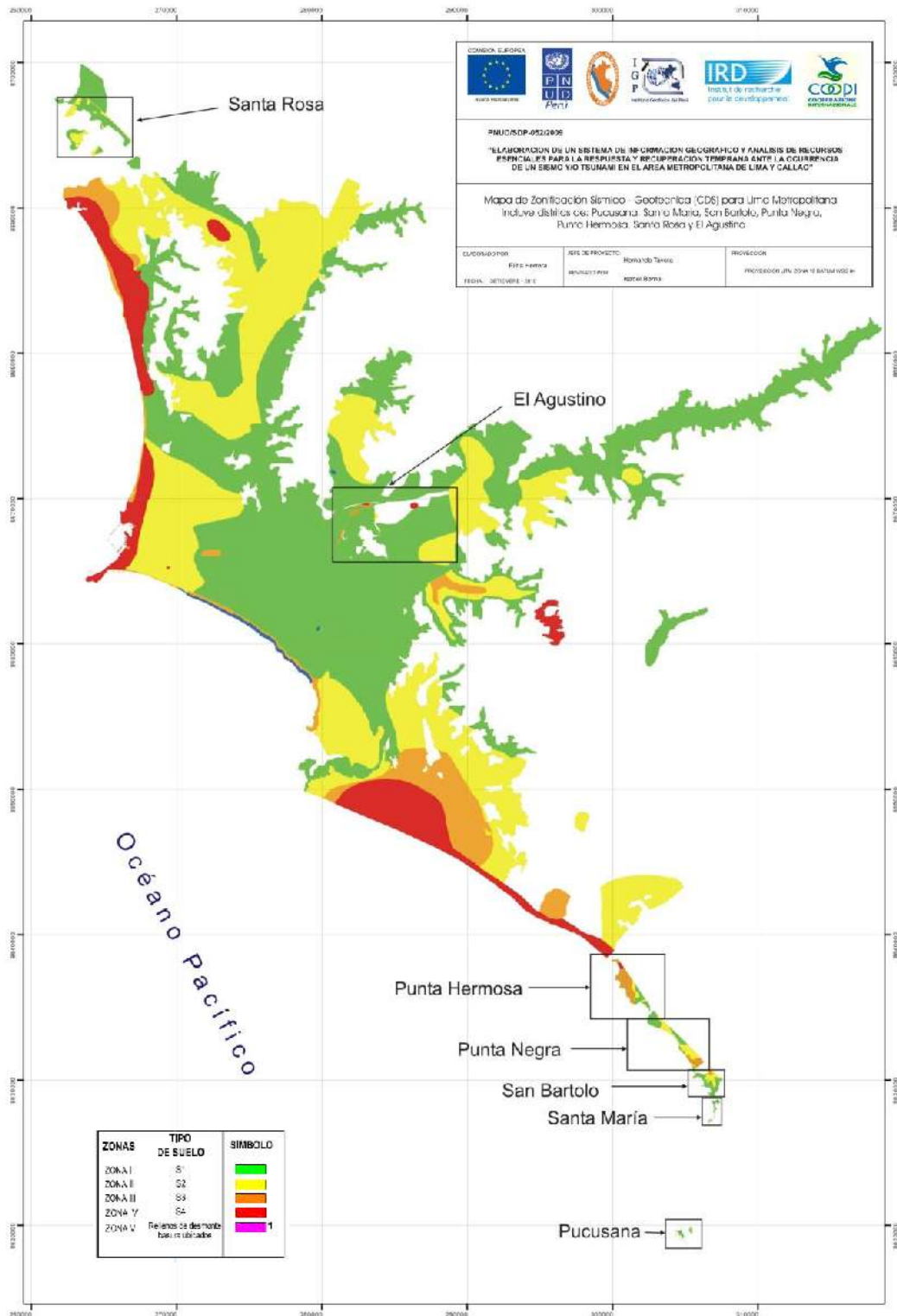


Figura 5: Mapa de Zonificación de suelos para Lima Metropolitana elaborado por el CISMID (APESEG, 2005) y complementado por el IGP (distritos en recuadro) dentro del proyecto PNUD (PNUD, 2010)

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

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 λ = Parámetro que depende de la rigidez del sistema estructural). Por ejemplo, para zonas firmes de la ciudad de México el valor de λ es igual a 10 (Muria y Gonzáles, 1993); mientras que, para Lima es de 25 (Guiller et al. 2014). Conocida la tipificación de suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar los valores indicados a fin de reducir la vulnerabilidad de las estructuras.

7.- METODOLOGÍA

Para la ejecución del estudio de Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad de Huarmey 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 Huarmey, fueron instaladas en el interior de los Colegios Inca Garcilaso de la Vega y Miguel Grau (Figura 6). Estas estaciones están en operación y vienen 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 estas estaciones son parte de la Red Acelerométrica nacional a cargo del IGP.

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 Huarmey. Conocido el modelo de fuente sísmica y obtenida las cartas de batimetría y topografía con alta resolución, el modelado numérico del tsunami se realiza con el algoritmo TUNAMI-N2 desarrollado por investigadores de la Universidad Tohoku de Japón (Goto y Ogawa, 1992). Los resultados obtenidos permiten conocer las zonas de inundación, el tiempo de llegada y la altura de la

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



Figura 6: Colegios y estaciones acelerométricas instaladas en la ciudad de Huarney

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 7), considerando bases de

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



Figura 7: Imagen del terreno sobre el cual se ha realizado el trabajo geológico y geomorfológico

.- **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 Huarmey.

.- **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 8).



Figura 8: Equipo sísmico utilizado para el registro de vibraciones ambientales: sensores Lennartz (2N) y registrador CityShark

En la Figura 9, 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 NCH-170 presenta diversidad de pulsos de variada amplitud debido a la presencia de ruidos que pueden ser filtrados, previos a su análisis, para no afectar a la información a utilizarse en este estudio. El registro NCH-117 corresponde a un punto libre de ruidos de fondo.

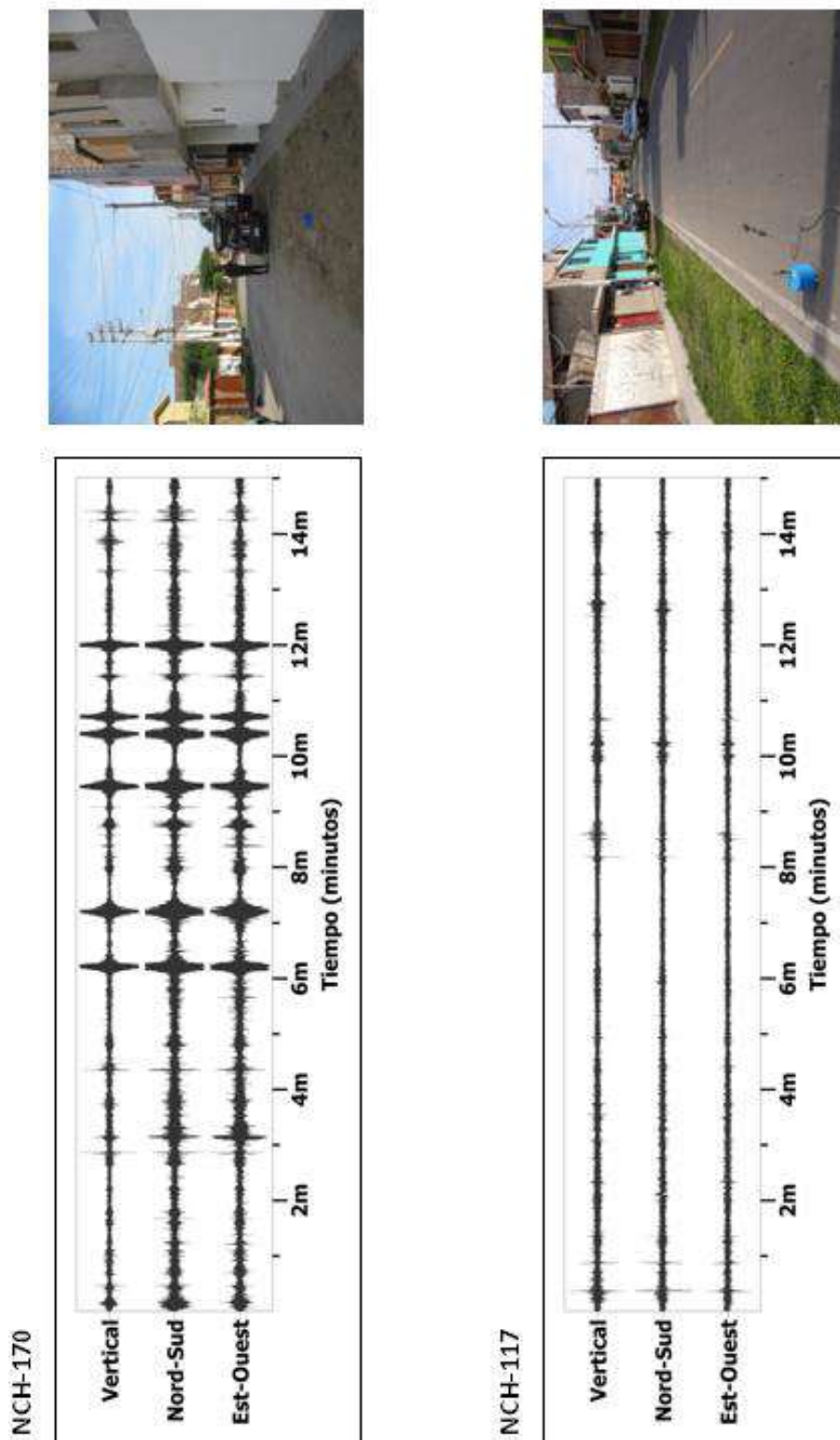


Figura 9: Imágenes de la disposición del equipo sísmico para el registro de vibraciones ambientales. Ejemplos de registros de vibración ambiental obtenidos sobre una zona libre de ruidos de fondo (NCH-117) y otro con ruido aleatorio (CNH-170). Obsérvese las diferentes amplitudes de la señal registrada en cada punto.

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 10), las mismas que están definidas por las condiciones geológicas y geomorfológicas de las primeras decenas de metros por debajo de la superficie. Debe entenderse que la variación de las propiedades físicas de cada capa estratigráfica superficial de diferente espesor, geometría y composición litológica, causaran o no, la amplificación de las ondas sísmicas incidentes, propiedad que es utilizada para conocer las características físicas del suelo.

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

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

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.

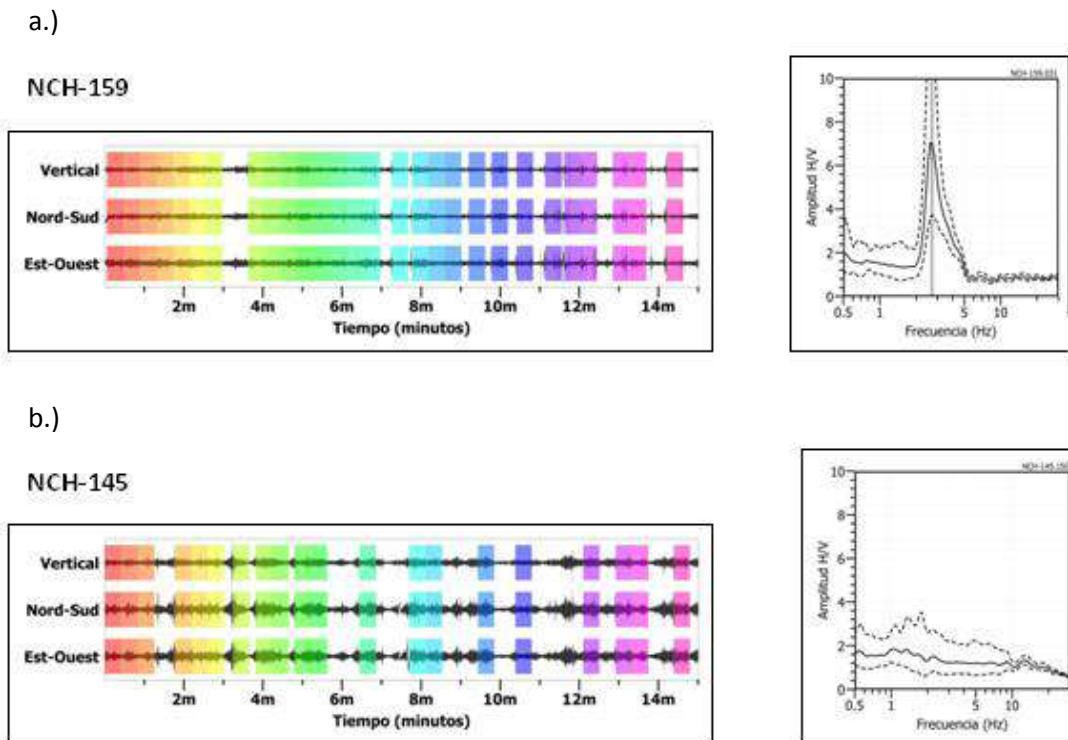


Figura 10: Ejemplo de selección de ventanas de registro de vibración ambiental (rectángulos de colores) en sus tres componentes y con sus respectivos gráficos de razones espectrales H/V. **a)** Registros y razones H/V donde se identifican frecuencias predominantes, **b)** Registros en los cuales no resalta 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.

.- **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 11). 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.



Figura 11: Imagen de la disposición del equipo de refracción sísmica para la toma de datos

.- **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 12).

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

topografía. La profundidad de investigación depende del dispositivo empleado de acuerdo al interés del estudio.



Figura 12: Imagen de disposición del equipo de prospección eléctrica para la toma de datos

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 Huarney 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 13). Una de estas ciudades es Huarney 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 14, 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 Huarney fue de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Otros sismos importantes produjeron en la ciudad de Huarney 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.

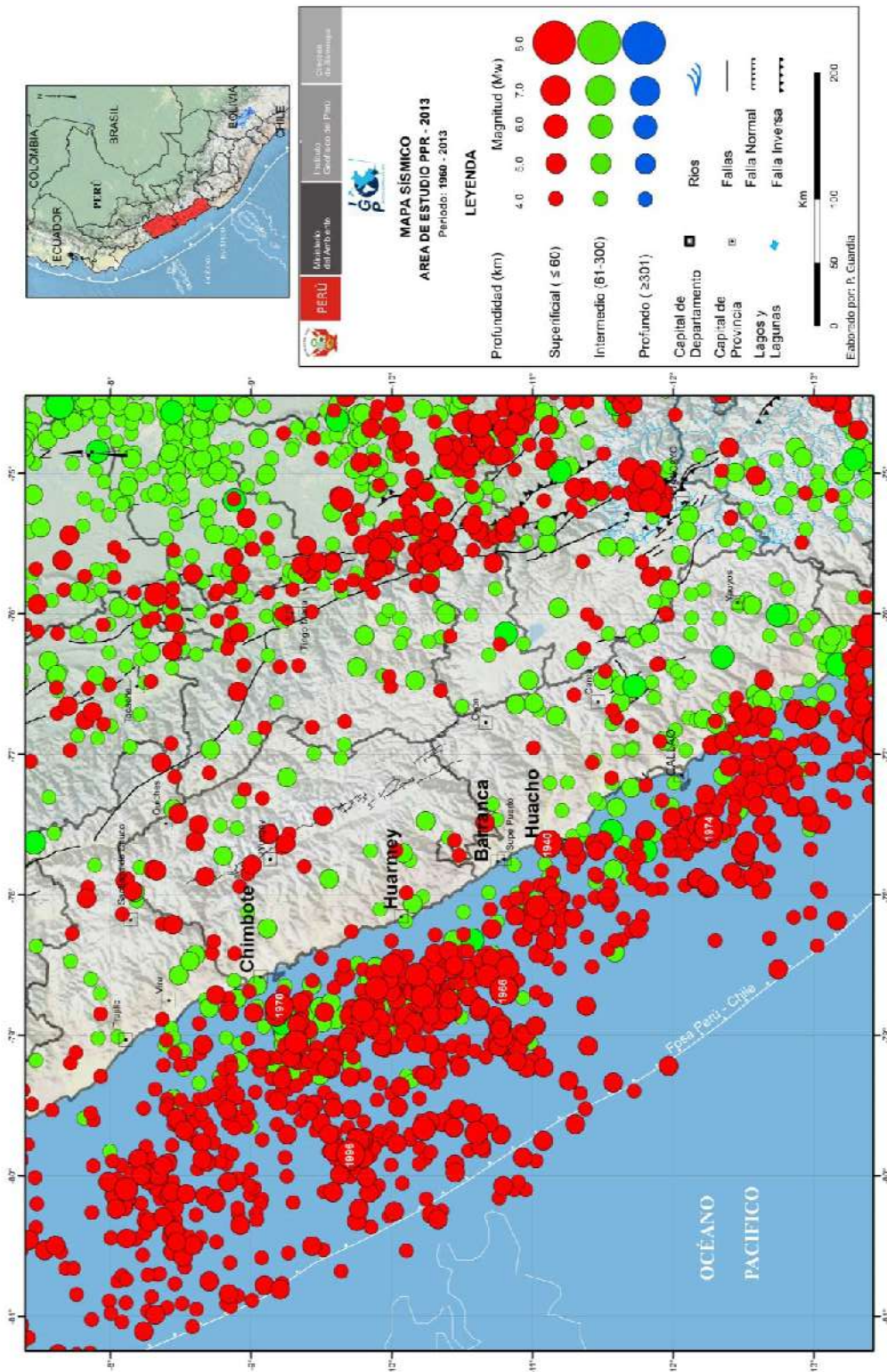


Figura 13: Mapa de sismicidad regional para el borde occidental de la región centro del Perú. Los sismos de mayor magnitud están indicados por el año de ocurrencia dentro de los círculos mayores.

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 Huarmey 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.

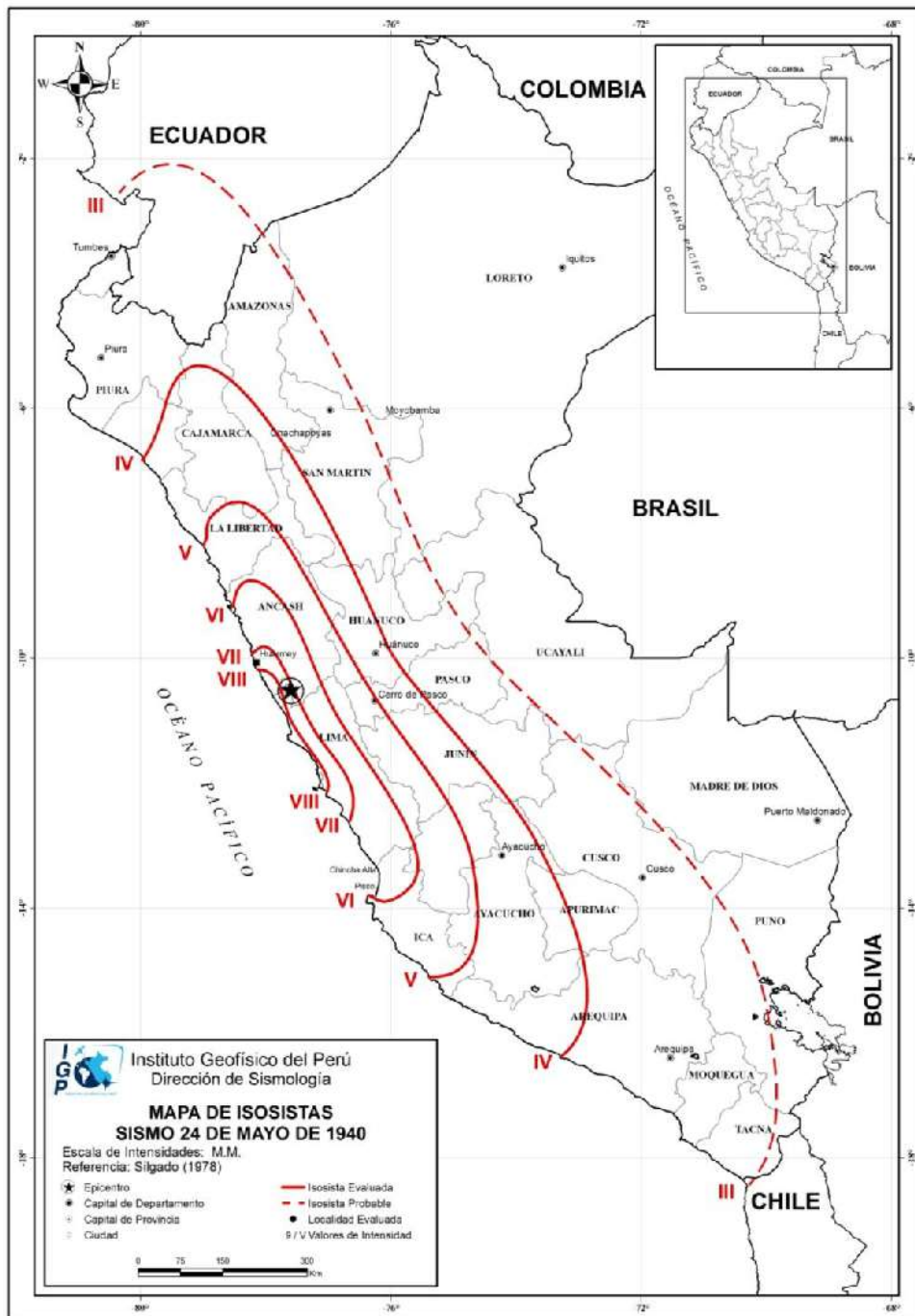


Figura 14: Mapa de intensidades correspondiente al sismo del 24 de mayo de 1940 (8.0Mw). En la ciudad de Huarmey las intensidades fueron el orden de VIII en la escala de Mercalli Modificada.

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 420 a 440 gals (Figura 15), 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 Huarney.

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, inundo 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 Huarney, debido probablemente a no existencia de obras y/o población en sus cercanías para los años en que estos peligros se hicieron presentes.

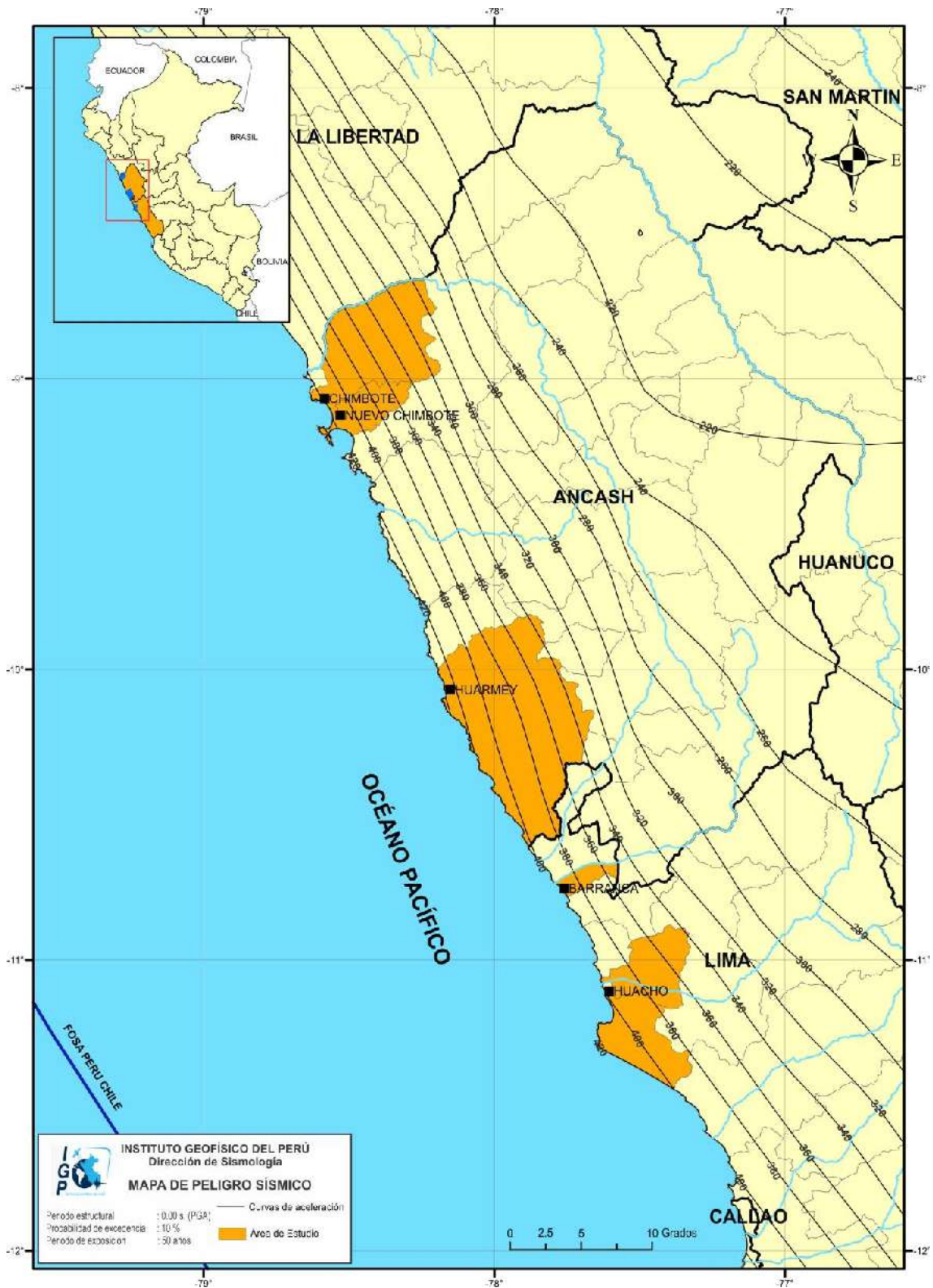


Figura 15: Peligro Sísmico para el borde occidental de la región central del Perú correspondiente a un periodo de retorno de 50 años con el 10% de excedencia.

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 Huarney, 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 2135 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 Bahía de Huarney 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.

Los resultados obtenidos para la zona costera de la ciudad de Huarmey 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 que oscilarían entre 5 a 6 metros en Puerto Huarmey y playa El Rincón; mientras que, en las playas Pejespero y Boca del Diablo, las olas tendrían alturas de 4-5 metros (Figura 16).

Por otro lado, en la Figura 17 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 1,200 metros en Puerto Huarmey, 500 metros en el poblado de San Nicolás y playa El Rincón, 600 metros en la playa Boca del Diablo, 300 metros en la playa Pejespero y más hacia el norte, distancias de hasta 500 metros. La altura del volumen de agua sería de 4 a 5 metros en las playas Pejespero y Boca del Diablo, entre 5 y 6 metros en la playa El Rincón y Puerto Huarmey, y de 3 a 4 metros en la localidad de San Nicolás. En este escenario el tsunami no afectaría a la ciudad de Huarmey

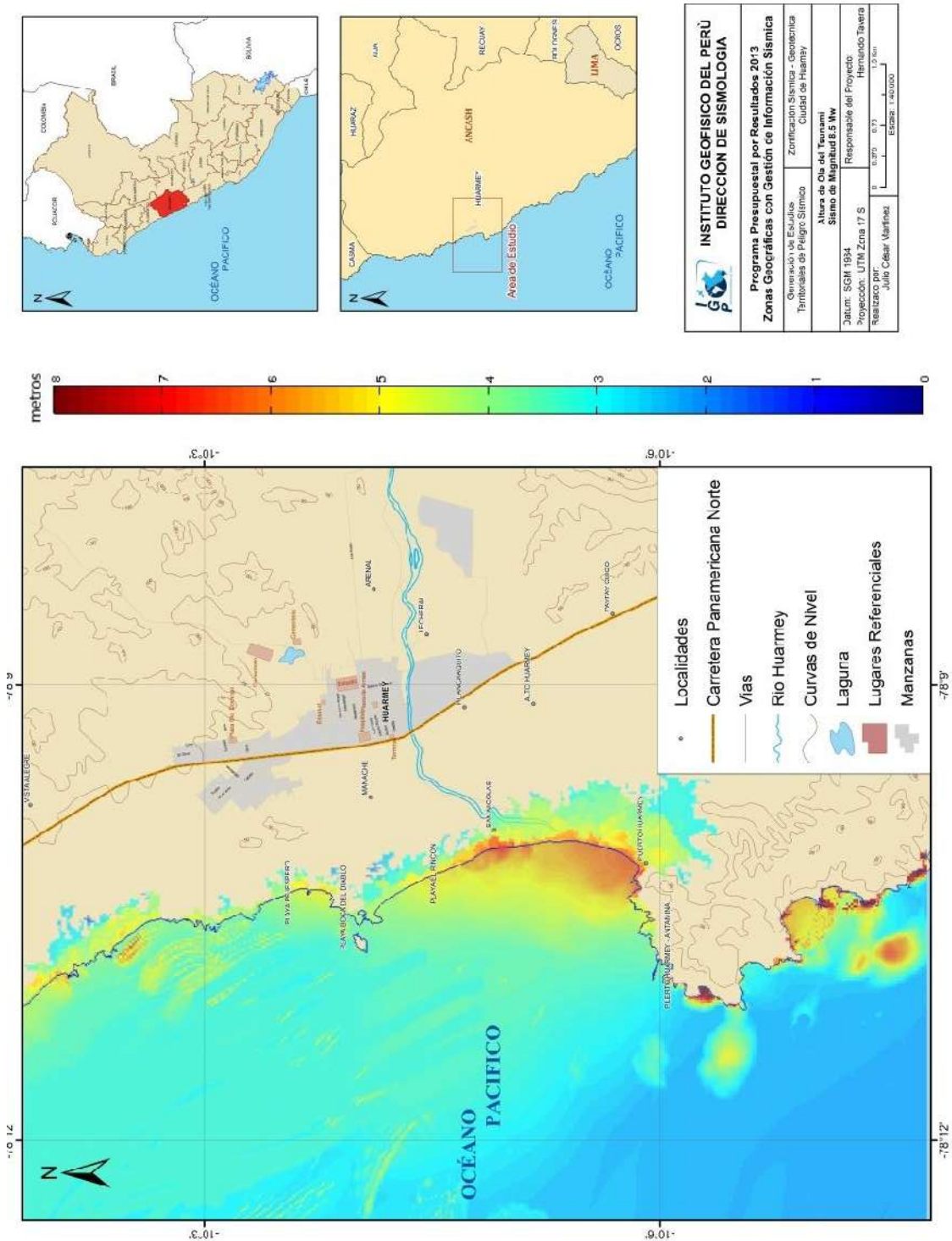


Figura 16: Mapa de altura de ola de tsunami en la zona costera de la ciudad de Huarney.

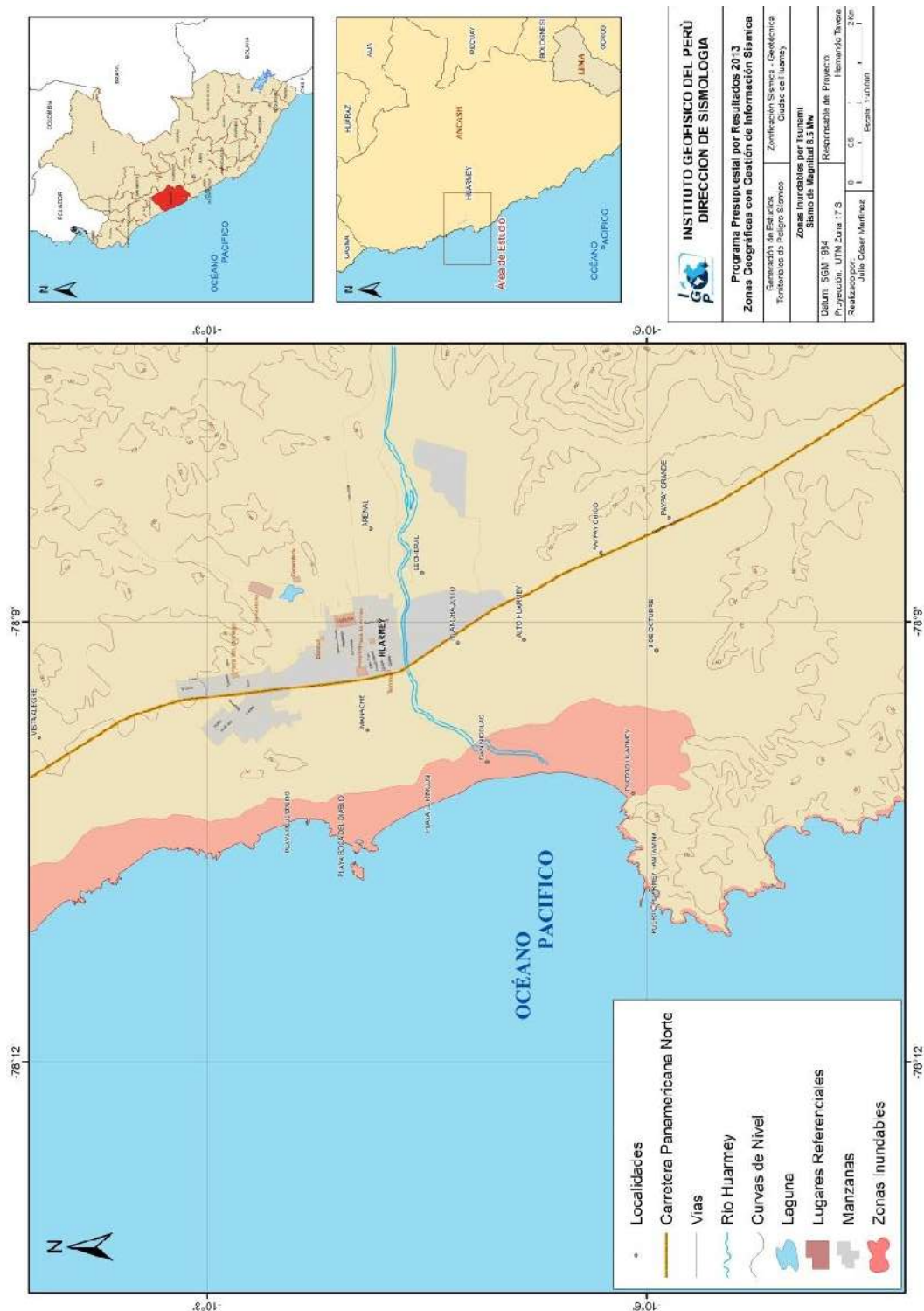


Figura 17: Mapa de niveles de inundación horizontal en la zona costera de la ciudad de Huarney debido a la ocurrencia de un tsunami

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). 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 17-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 Huarmey se asienta sobre una penillanura aluvial con una cota promedio de 25 m.s.n.m. (Figura 18). En los alrededores del área, hacia su extremo este, se observa la presencia de colinas 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 Huarmey se encuentra asentada sobre un valle cuyas pendientes se encuentran entre los 10° en promedio (Figura 19).

9.1.2. Unidades Geomorfológicas

El distrito y ciudad de Huarmey se encuentra emplazado sobre el abanico aluvial del río Huarmey, siendo posible reconocer las siguientes unidades geomorfológicas (Figura 20):

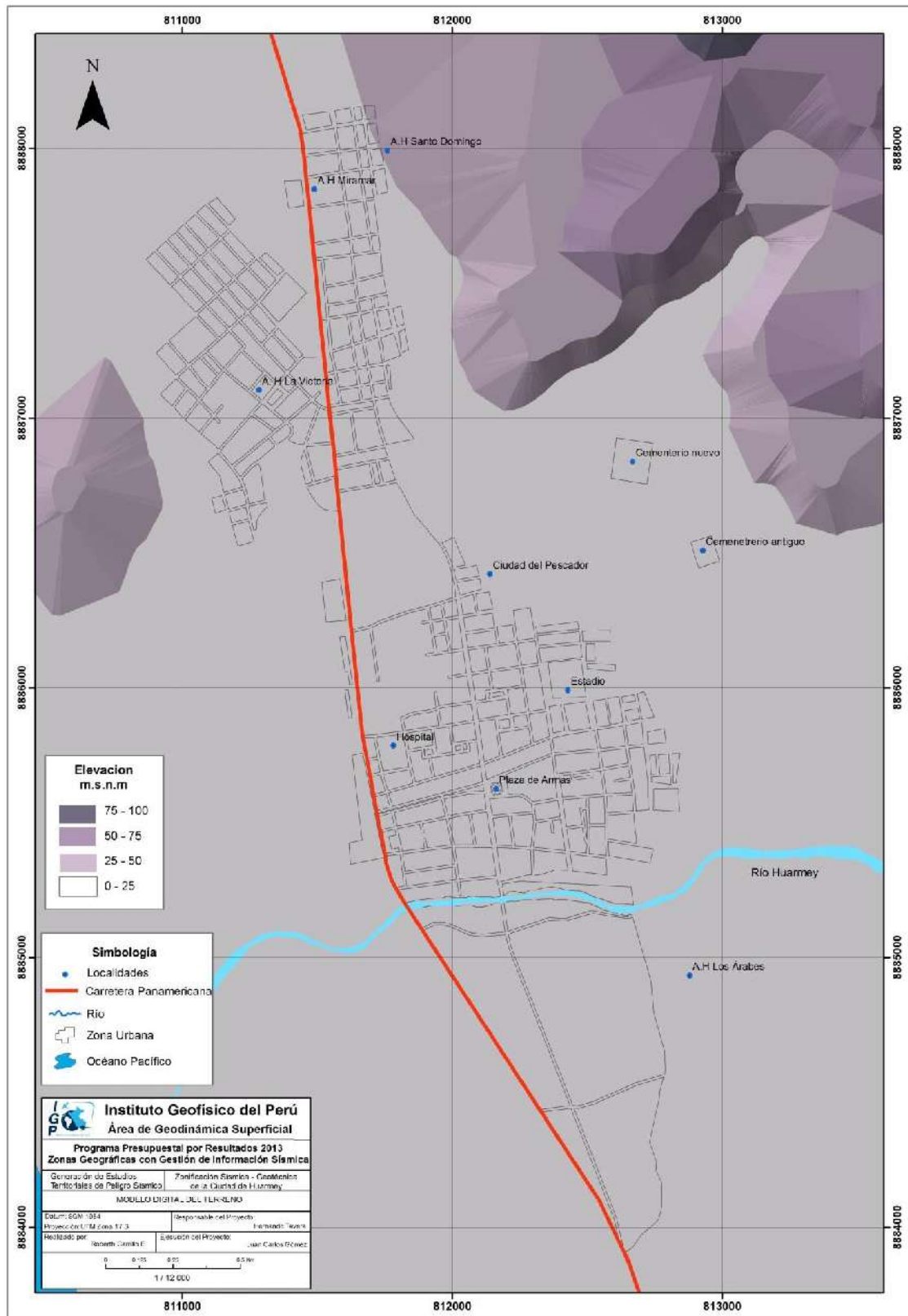


Figura 18: Mapa de modelo digital del terreno de la ciudad de Huarney

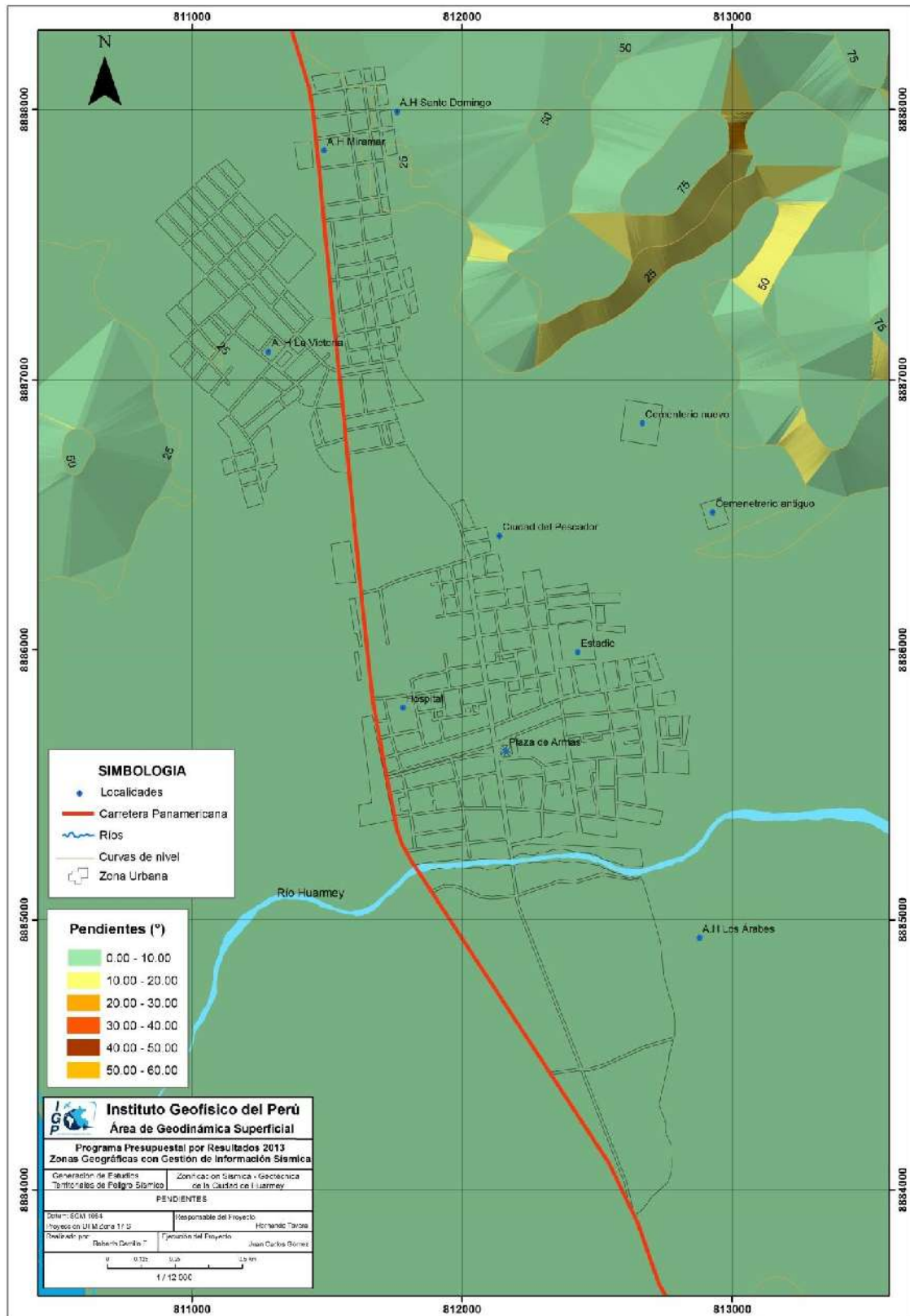


Figura 19: Mapa de pendientes de la ciudad de Huarmey

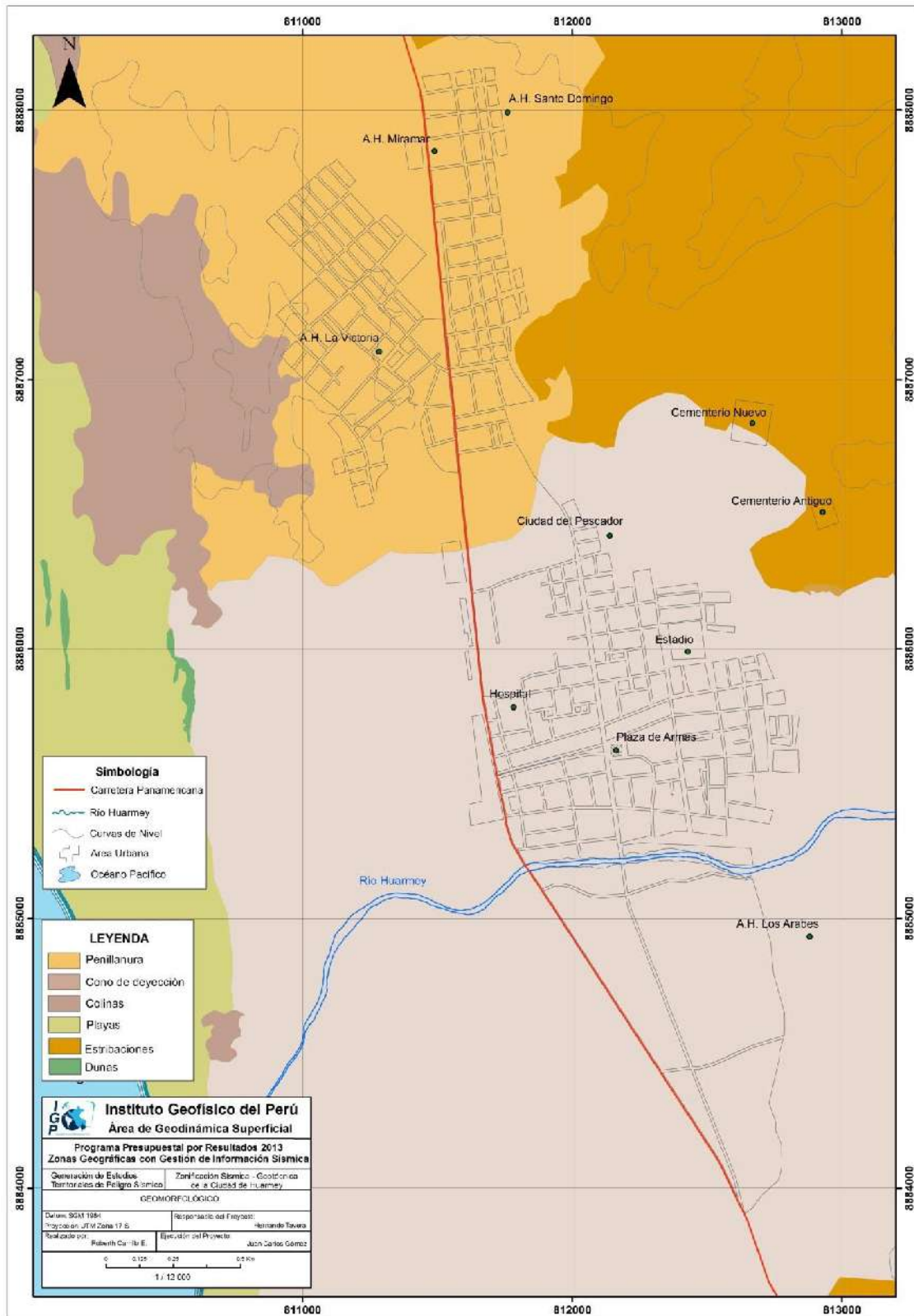


Figura 20. Mapa geomorfológico de la ciudad de Huarney

.- *Estribaciones de la Cordillera Occidental*: Esta unidad comprende montañas que alcanzan alturas de 800 a 1200 m.s.n.m, y están constituidas principalmente por rocas intrusivas del Batolito de la Costa. Presentan topografía abrupta y están disectadas por numerosas quebradas. El intemperismo en esta unidad es bajo (Figura 21).

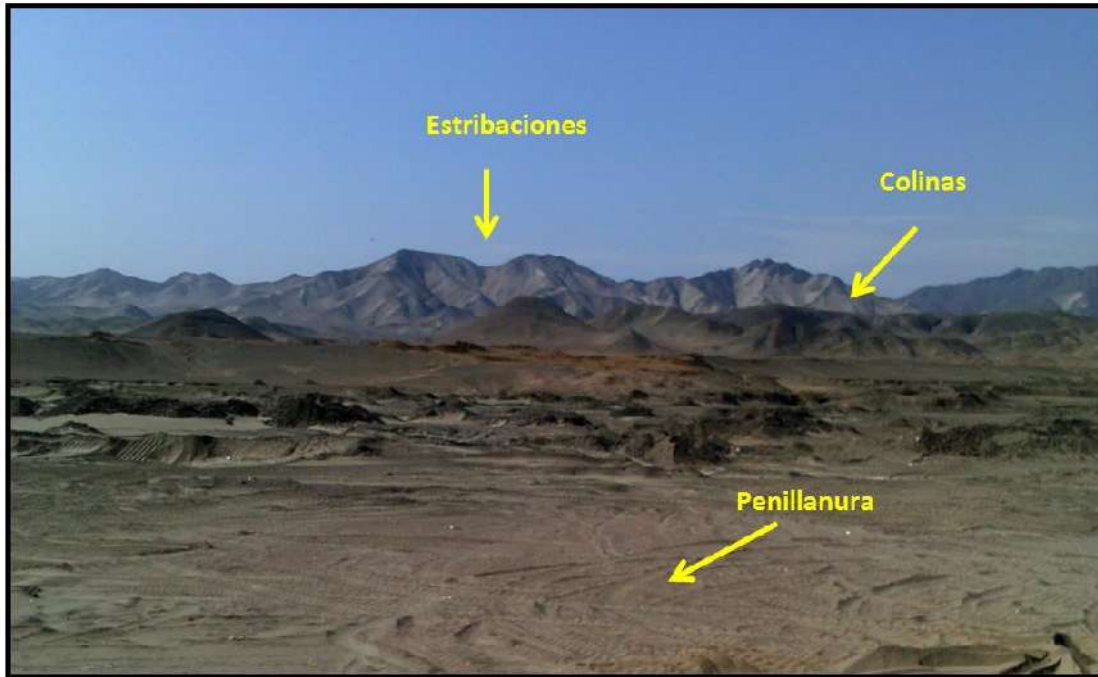


Figura 21: Vista de las estribaciones andinas ubicadas al norte de la ciudad de Huarmey.

.- *Penillanura*: Estos depósitos se forman en las márgenes del río debido a la pendiente del cauce y al desnivel que hay entre este y sus márgenes. Durante las épocas de avenidas, cuando las corrientes rebasan sus cauces y se direccionan a las zonas bajas, pierden velocidad y como consecuencia depositan su carga de manera irregular formando terrenos llanos a suavemente ondulados. Con el transcurso del tiempo estos accidentes formados al principio, son sometidos a procesos de dinámica fluvial (proceso erosivo de los ríos que modifica el relieve terrestre).

En Huarmey la penillanura está conformada por materiales como arenas, gravas, arcillas y limos (aluviales), y en estas geoformas se encuentran los A.H. La Victoria y Miramar, ubicados a 1.5 km en dirección norte con respecto a la ciudad de Huarmey (Figura 22).



Figura 22: Penillanura ocupada por los A.H. La Victoria y Miramar.

.- *Lomas y colinas*: Son geoformas de poca elevación y forma cónica que se encuentran en el extremo oeste de la ciudad de Huarmey, a 200 metros del borde costero. Entre las estribaciones de la cordillera y la planicie costanera, presentan desniveles de 40 a 50 metros hacia su extremo oeste y de 60 a 70 metros, hacia el este. Su morfología es ondulada y la pendiente de las laderas no sobrepasa los 30°. Generalmente, la unidad está cubierta por capas de arena eólica y material coluvial (Figuras 23 y 24), siendo afectada por agentes erosivos (intemperismo y meteorización), como es el caso del viento como el más importante.

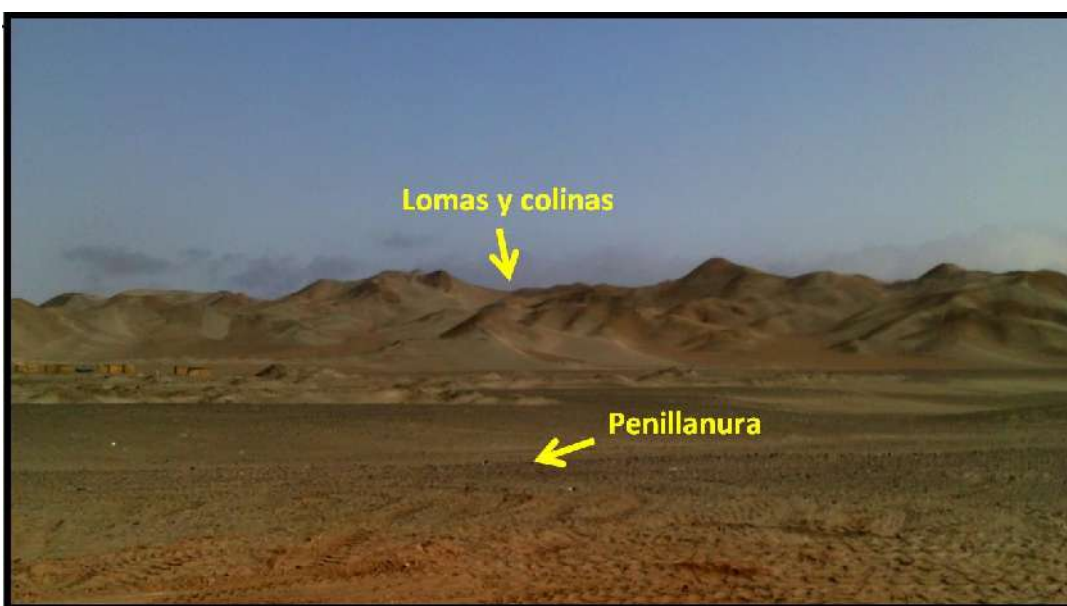


Figura 23. Colinas ubicadas al oeste de la ciudad de Huarmey: capas de arena de origen eólico.



Figura 24: Vista de las colinas, ubicadas al NE de la ciudad de Huarmey: A.H. Miramar

.- *Conos de Deyección*: Corresponde a zonas con topografía plana y conformada por materiales de origen aluvial y coluvial predominantemente. Debe su formación al cambio gradual de pendiente del curso de un río, desde su nacimiento, cubriendo las partes bajas y amplias de los valles.

Este tipo de geoforma es afectada directamente por los procesos de dinámica fluvial (socavamiento, erosión, intemperismo, carga de material, entre otros), responsables del modelado del relieve en el transcurso del tiempo. En la ciudad de Huarmey, los conos de deyección están constituidos por materiales de acarreo, transportados por el río del mismo nombre, para luego mostrar una topografía moderada (zonas planas) dentro de un área de aproximadamente 4 x 5 km de largo. Este tipo de geoformas son aprovechadas para la actividad agrícola (Figura 25).



Figura 25: Cono de deyección cubierto por depósitos aluviales y eluviales utilizados para la agricultura.

.- *Dunas*: Son acumulaciones de arenas formadas por la dinámica del viento, que al mismo tiempo, es responsable de su morfología. También son llamadas arenas eólicas por formarse en el litoral costero. En la ciudad de Huarney las dunas se encuentran a 1.5 km de distancia en dirección noroeste sobre una extensión que varía de 20 a 100 m de largo y de ancho de 2 a 4 m. Por lo general, estas dunas presentan cobertura vegetal por la presencia de humedad superficial (Figura 26).



Figura 26: En la ciudad de Huarney, las dunas presentan vegetación en la parte superficial.

.- *Playas*: Presentan acumulaciones de arena, grava o mezcla de ambas, situadas en el borde costero con ancho variable y en cuya dinámica interviene fundamentalmente el oleaje. El transporte de los sedimentos hacia la zona de playa es de origen fluvial, por erosión de los acantilados, sedimentos de fondo marino y eólico, a los que se suman los provenientes de actividades antrópicas.



Figura 27: Esta unidad está cubierta frecuentemente por palizada transportada por la acción de la marea.

En la ciudad de Huarney, la zona de playa se extiende a lo largo de la bahía del mismo nombre sobre una superficie de aproximadamente 6 km de largo y anchos que se incrementan de sur a norte, puesto que en esa dirección se produce la dinámica erosiva y de sedimentación. Limita por el sur con el Puerto Huarney (Figuras 27 y 28) y por el norte con la playa Tuquillo. Sobre estas superficies se desarrollan actividades agrícolas.



Figura 28: Desembocadura del río Huarney en el océano. Áreas cubiertas por material de arrastre que han sido depositados por el río (gravas y palizada)

9.2.- Geología

Como información de base se consideró el Cuadrángulo Geológico de Huarney y Huayllapampa editado por INGEMMET a escala 1/100,000 (Boletín N°33, Hoja: 21-g). En general, se observa que el área de estudio se emplaza sobre afloramientos de la Formación La Zorra compuesto por rocas piroclásticas bien estratificadas, seguidas del Miembro Los Morros conformado por andesitas porfiríticas bien meteorizadas. Del mismo modo, afloran hacia la dirección sureste y suroeste de la ciudad de Huarney, una secuencia de depósitos aluviales del Terciario conformados por conglomerados mal estratificados, Figura 29.

Finalmente, en el área de estudio afloran una serie de depósitos del Cuaternario Reciente como aluviales constituidos de gravas gruesas a finas bien clasificadas y fluviales que ocupan el cauce del río Huarney. En el borde costero están presentes depósitos marinos constituidos de arenas de grano fino redondeadas.

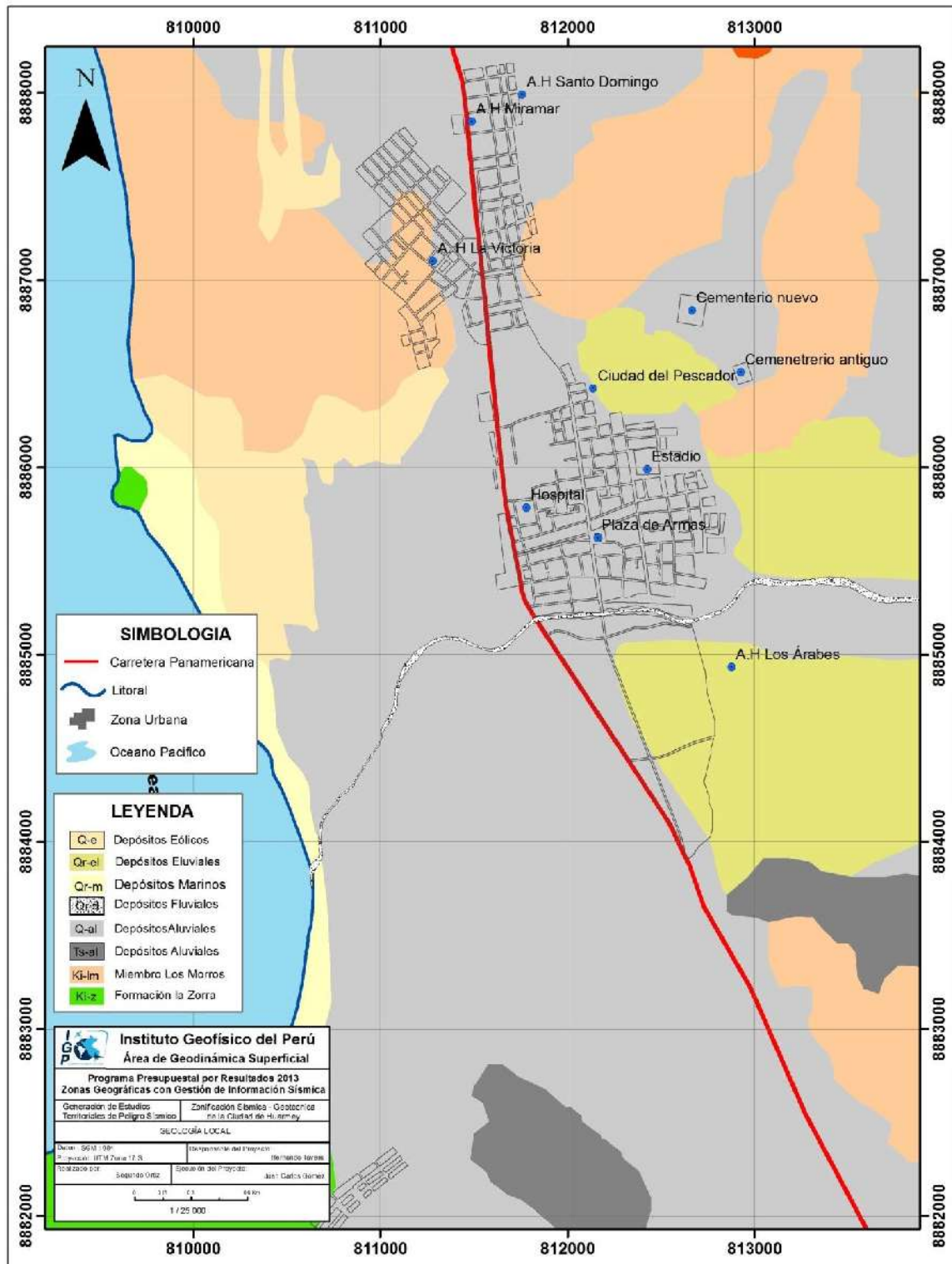


Figura 29: Mapa geológico de la ciudad de Huarney

Por otro lado, en el extremo este de la ciudad de Huarney afloran depósitos eluviales que se asientan sobre las zonas de cultivo y los depósitos eólicos, compuestos principalmente por arenas y limos.

9.2.1.- Rocas Volcánicas

.- *Formación La Zorra*: Constituida principalmente por flujos piroclásticos en capas delgadas bien estratificadas. Está unidad aflora en el extremo este de la ciudad de Huarney (zonas de Santo Domingo y Campanario) y en el extremo noreste, en las inmediaciones de la zona denominada Pampa Tres Piedras. Dentro de esta formación se tiene las siguientes subunidades:

Miembro Los Morros: Aflora en el extremo norte de la ciudad de Huarney, prolongándose desde la playa Peje Saper hasta playa Honda y en el extremo noreste, afloran junto a la formación La Zorra. Litológicamente está constituida por rocas volcánicas andesita porfírica con fragmentos tipo amigdaloides (cavidades esféricas formadas rocas volcánicas debido a los gases generados durante la erupción). Los Morros considera una serie de flujos de lodo piroclástico (ceniza, lapillis, etc.) producidos por erupciones submarinas. Las rocas volcánicas se encuentran meteorizadas, ligeramente oxidadas, rugosas y fracturadas. Su color varía de gris a negro (Figuras 30 y 31).



Figura 30: Miembro Los Morros ubicado en las inmediaciones del A.H. Miramar. Las laderas están cubiertas por material eólico.



Figura 31: Colinas de andesitas porfiríticas cubiertas por material eólico.



Figura 32: Terrazas aluviales presentes en el extremo sureste de la ciudad de Huarmey.

.- *Depósitos aluviales del Terciario*: Antiguas acumulaciones de sedimentos transportados por los ríos de la región y depositados a lo largo del valle y quebradas secas o desérticas formando terrazas y conos de deyección. Se encuentran conformados por gruesos conglomerados mal clasificados, mal estratificados y gravas polimícticas, que van desde angulosas a redondeadas, en matriz arenosa, limosa y

arcillosa con espesores del orden de 30 metros. Estos depósitos afloran claramente en el extremo sureste de la ciudad de Huarmey (zona Lecheral Alto) y a la entrada a Puerto Huarmey (Figuras 32 y 33).



Figura 33: Conglomerados de diversos diámetros presentes en el sector noreste de la ciudad de Huarmey (A.H. La Victoria).

9.2.2.- Depósitos del Cuaternario

Están constituidos por los siguientes tipos de depósitos:

.- *Depósitos Aluviales*: Estas acumulaciones ocupan el mayor porcentaje de área de la ciudad de Huarmey y sobre ellas, se encuentra asentada la población. Los depósitos afloran al norte, centro y sur de la ciudad, y están conformados por clastos angulosos a subredondeados, mal clasificados y moderadamente oxidados, en una matriz de arenas de grano fino a medio con presencia, en menor porcentaje, de limos (Figura 34).

.- *Depósitos Fluviales*: Los depósitos fluviales son acumulaciones de gravas y arenas redondeadas a sub-redondeadas con matriz areno-limoso y arcillas estratificadas formadas por acumulación reciente en el río Huarmey y quebradas presentes en el área de estudio. La dirección del transporte de los materiales a través del río, se realiza en dirección de Noreste a suroeste (Figura 35).



Figura 34: Corte en las inmediaciones del cementerio de Huarmey. Se observa capas de arena fina con niveles delgados de gravilla angulosa.



Figura 35: Depósitos fluviales a lo largo del cauce del río Huarmey.

.- *Depósitos Marinos*: Son depósitos de arena de grano fino redondeados y semiconsolidados que forman estructuras sedimentarias tipo ripples (ondulaciones formadas por el viento). Afloran a lo largo del litoral de la ciudad de Huarmey (Figura 36).



Figura 36: Depósitos marinos presentes, desde Puerto Huarmey hasta playa Huanchaquito.

.- *Depósitos Eluviales*: Estas acumulaciones se originan por la intensa meteorización in situ del substrato rocoso de una formación rocosa pre-cuaternaria. Están constituidos por material fino, como arcillas, limos y arenas que se encuentran al noreste de la ciudad de Huarmey. Sobre estos depósitos se desarrollan zonas de cultivo (Figura 37).

.- *Depósitos Eólicos*: Constituidos por acumulaciones de arenas finas redondeadas y limos que conforman lomadas que se encuentran cubriendo pequeñas depresiones y superficies planas. Estos depósitos presentan ligeras coberturas orgánicas producto de la humedad que existe en la zona. Se aprecia claramente, en algunos sectores como la Isla Manache (extremo noroeste de la ciudad de Huarmey) y en las inmediaciones del poblado La Cruz (Figura 38).



Figura 37: Labores agrícolas desarrolladas en suelos eluviales.



Figura 38: Depósitos eólicos acumulados en el litoral de las playas en Huarney.

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

Dentro del área de estudio, no se ha reconocido la existencia de movimientos en masa activos, a excepción de materiales inestables presentes en algunas laderas como consecuencia del desarrollo de actividades antrópicas. Estas laderas presentan inclinaciones del orden de 28° cubiertos por una cobertura de depósitos coluviales. Por ejemplo, en la Figura 39 se muestra un sector de la Agrupación de Viviendas Miraflores en donde los pobladores han usado sacos de arena a manera de muros de protección temporal para evitar el desprendimiento de fragmentos de rocas que puedan bloquear la carretera de acceso a los poblados anexos.



Figura 39: Agrupación de Viviendas Miraflores con presencia de movimientos de masa contenidos con sacos de arena a fin de que no bloquear la carretera de acceso.

9.3.2.- Inundación Fluvial

En la ciudad de Huarmey destaca, en su extremo norte, la presencia del río del mismo nombre y cuya cuenca pertenece al sistema hidrográfico de la vertiente del Océano Pacífico. Las principales características de este río son:

- .- Recorrido: el río Huarmey tiene una longitud de 101.288 km
- .- Pendiente en la desembocadura: del orden de 1.40°
- .- Pendiente en el curso medio: del orden de 0.50°
- .- Factor de forma de la cuenca del río: 0.35
- .- Coeficiente de compacidad de la cuenca del río: 1.58

De acuerdo al valor del “factor de forma”, la cuenca del río Huarmey tiene regular respuesta a las crecidas del flujo de agua.

Considerando sus características y los resultados obtenidos en estudios previos (ciudades sostenibles), se considera que la ciudad de Huarmey presenta zonas susceptibles a peligros de inundación. Este peligro considera la acumulación de agua en un lugar donde habitualmente no la hay y se produce por un exceso del volumen de agua registrado en un lugar y momento dado. La causa más común es debido a precipitaciones pluviales cuando se producen con frecuencia y/o durante tiempo prolongado. Si el caudal sobrepasa el nivel de almacenamiento del río se producirá el desborde del mismo, ocasionando la inundación.

Para conocer los caudales históricos se ha tomado como información base la contenida en el "Estudio Hidrológico en la Cuenca del río Huarmey" del año 2007 y considera como base las lecturas realizadas en la estación hidrométrica Puente Huamba, ubicada aguas arriba en el río Huarmey, a 34 km al NE de la ciudad de Huarmey (coordenadas UTM, 8896898.659N - 185657.598E) a una cota promedio de 540 m.s.n.m. (Figura 40). Los datos corresponden a un periodo de 27 años (1974-2001), presentándose el mayor caudal en los años 1998 y 1999. Del mismo modo, se ha considerado la información de la estación Puente La Carretera (coordenadas UTM, 810589.1304E - 8885860.881N) en la cota de 30 m.s.n.m. y para un periodo de 42 años (1932-1973). Para este último, se tiene un caudal Medio Anual de 3.5 metros cúbicos por segundo.

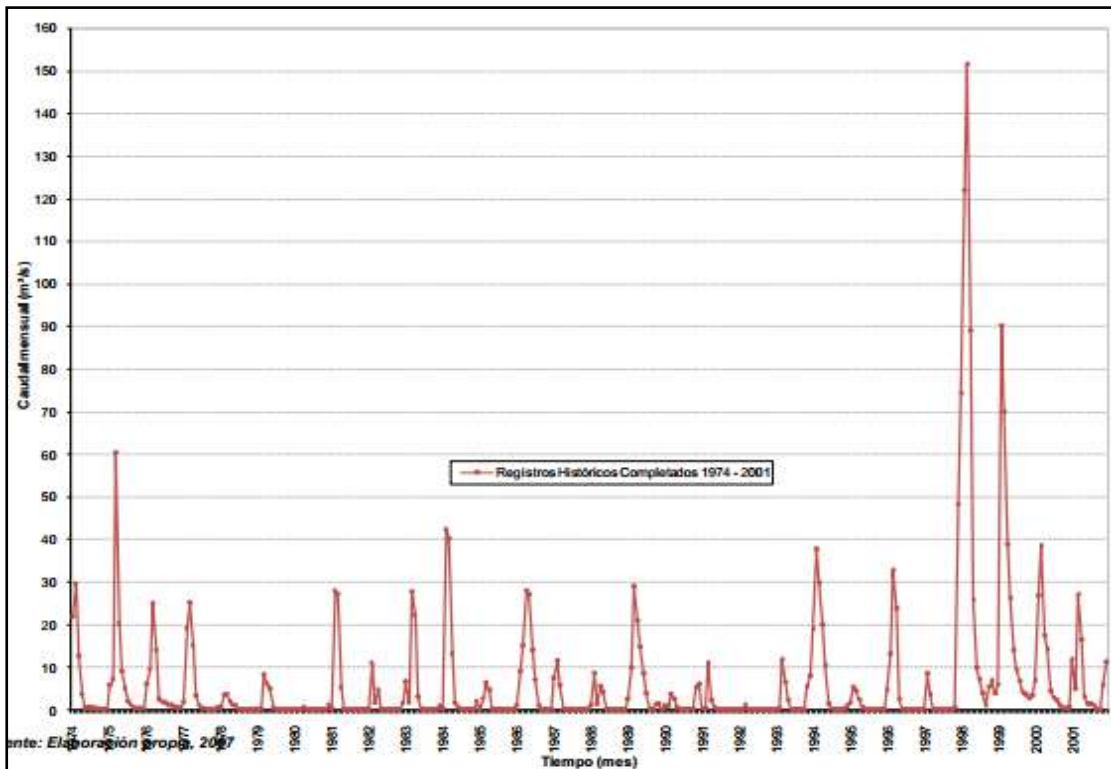


Figura 40: Registros históricos de caudales mensuales (1974 - 2001) correspondientes a la estación Puente Huamba.

Durante el periodo histórico, en la ciudad de Huarmey se han producido inundaciones severas derivadas del Fenómeno El Niño en los años 1972, 1973, 1976, 1982 y 1983, este último afectó zonas contiguas al río, 1km aguas arriba del puente Huarmey correspondiente a los sectores Buenos Aires y Los Árabes. Del mismo modo,

durante El Niño de 1998, nuevamente la zona de Buenos Aires soportó severas inundaciones, principalmente en las calles/avenidas Pativilca, Paramonga, 2 de Mayo y Ramón Castilla, causando la elevación del nivel freático que puso en peligro la estabilidad de cimentaciones en las viviendas. Asimismo, se produjo el desborde del río Huarmey que interrumpió el tránsito en la carretera Panamericana debido a los daños producidos en la plataforma de la vía.

.- *Modelado Numérico de Niveles de Inundación:* Para el modelado y evaluación de las zonas susceptibles a peligros de inundación en la ciudad de Huarmey, se ha realizado su levantamiento topográfico detallado y la generación de 11 secciones transversales al río, todas distribuidas de manera proporcional sobre una longitud de 3.8 km aproximadamente. Las secciones ubicadas en las inmediaciones de la ciudad se encuentran cada 200 metros de distancia; mientras que, las que están en las zonas agrícolas cada 500 metros de distancia, ver Figura 41.

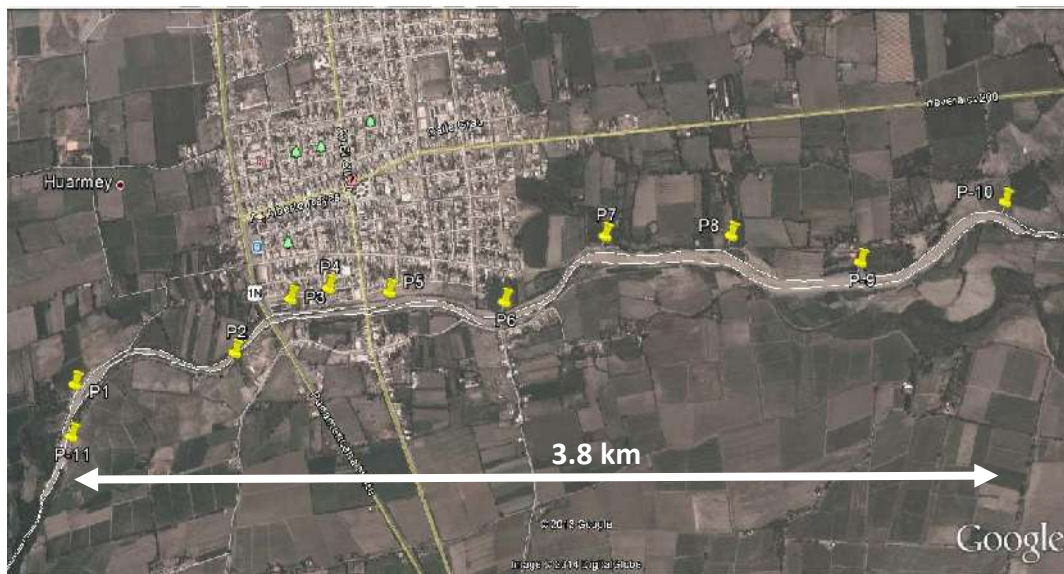


Figura 41: Ubicación de las 11 secciones topográficas construidas a lo largo del río Huarmey.

Para el modelado numérico del río Huarmey se ha utilizado el programa HEC-RAS y un caudal medio anual mínimo de 3.5 metros cúbicos por segundo y otro máximo de 270 metros cúbicos por segundo (Estación Puente Huamba). Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo 1, siendo sus principales aportes los siguientes (Figura 42):

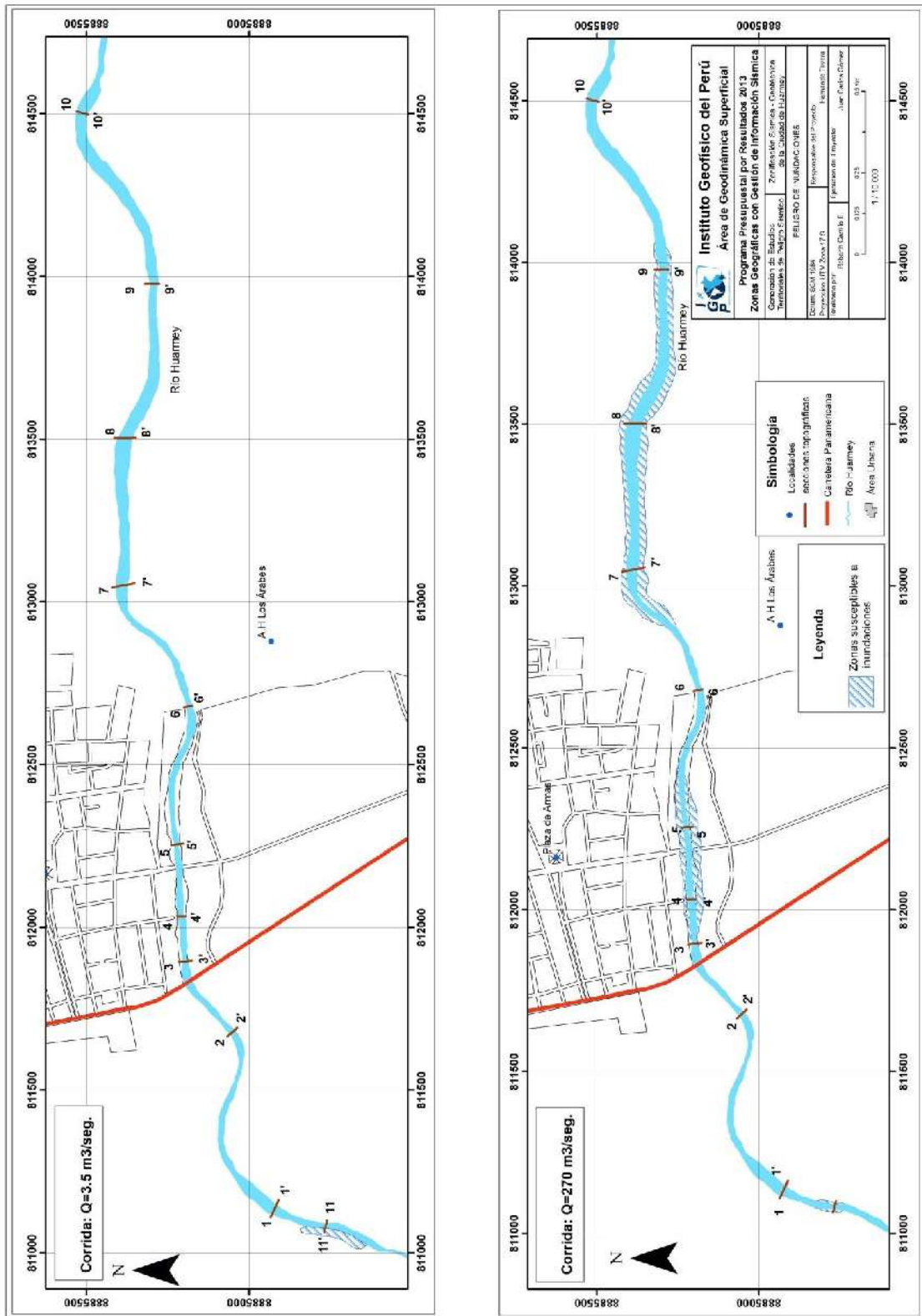


Figura 42: Simulación numérica para el peligro de inundación en la ciudad de Huarney

.- Considerando un caudal promedio anual de $3.5 \text{ m}^3/\text{seg.}$, solo se observaría inundación en el área de la sección-11, ubicada a 292 m al oeste del puente Huarmey, sobre la carretera Panamericana, pudiendo afectar zonas de cultivo de espárragos, contiguos a ambos márgenes del río Huarmey.

.- Considerando un caudal máximo de $270 \text{ m}^3/\text{seg.}$ (Eventos extremos causados por Fenómeno El Niño), los posibles niveles de inundación están presentes en varias áreas, siendo sus características las siguientes (Figura 43):

- *Extremo sureste de la ciudad de Huarmey (secciones 7, 8 y 9), el posible desbordamiento del río podría afectar un área de 500 m^2 compuesto por terrenos de cultivo (ver Figura 42).*
- *Extremo sur de la ciudad de Huarmey, en la intersección entre la Av. Olivar con la carretera Panamericana (secciones 3, 4 y 5): el desbordamiento del río afectaría áreas aledañas a ambos márgenes del río, viviendas que pertenecen al sector Buenos Aires y A.H. Los Árabes. Las calles/avenidas afectadas directamente serían Paramonga y Pativilca (ver Figura 42).*



Figura 43: Se muestra tres áreas susceptibles a inundación ante un eventual aumento del caudal del río Huarmey debido a lluvias extraordinarias. 1: A.H. Buenos Aires; 2: extremo SE de la ciudad y 3: extremo SE de la ciudad cerca de la zona de playa.

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 Huarmey se construyeron 10 calicatas (Figura 44, Tabla 2) 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 44, Tabla 2). El total de la información geotécnica se muestra en el Anexo 2.

Tabla 2: Coordenadas UTM para la identificación de las calicatas y posteadora

CALICATA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (Y)	POSTEADORA	UTM ESTE (m)	UTM NORTE (m)
C-01	812526	8884924	P-01	812343	8885292
C-02	811943	8885266	P-02	812497	8885536
C-03	812691	8885424	P-03	811765	8885528
C-04	812367	8885844	P-04	811989	8886032
C-05	811824	8885846	P-05	811497	8886285
C-06	812466	8886270	P-06	811974	8886553
C-07	811204	8886769	P-07	811333	8887119
C-08	811711	8116834	P-08	811719	8887327
C-09	811107	8887774	P-09	812079	8884763
C-10	811641	8887823			

10.1.- Clasificación de Suelos SUCS

En base a la información geotécnica recopilada de las calicatas, postes e inspección visual del terreno en la ciudad de Huarmey y su posterior análisis en laboratorio, se ha identificado, según la clasificación SUCS, la existencia de 6 tipos de suelos cuyas características se describen a continuación (Tabla 3, Figura 45):

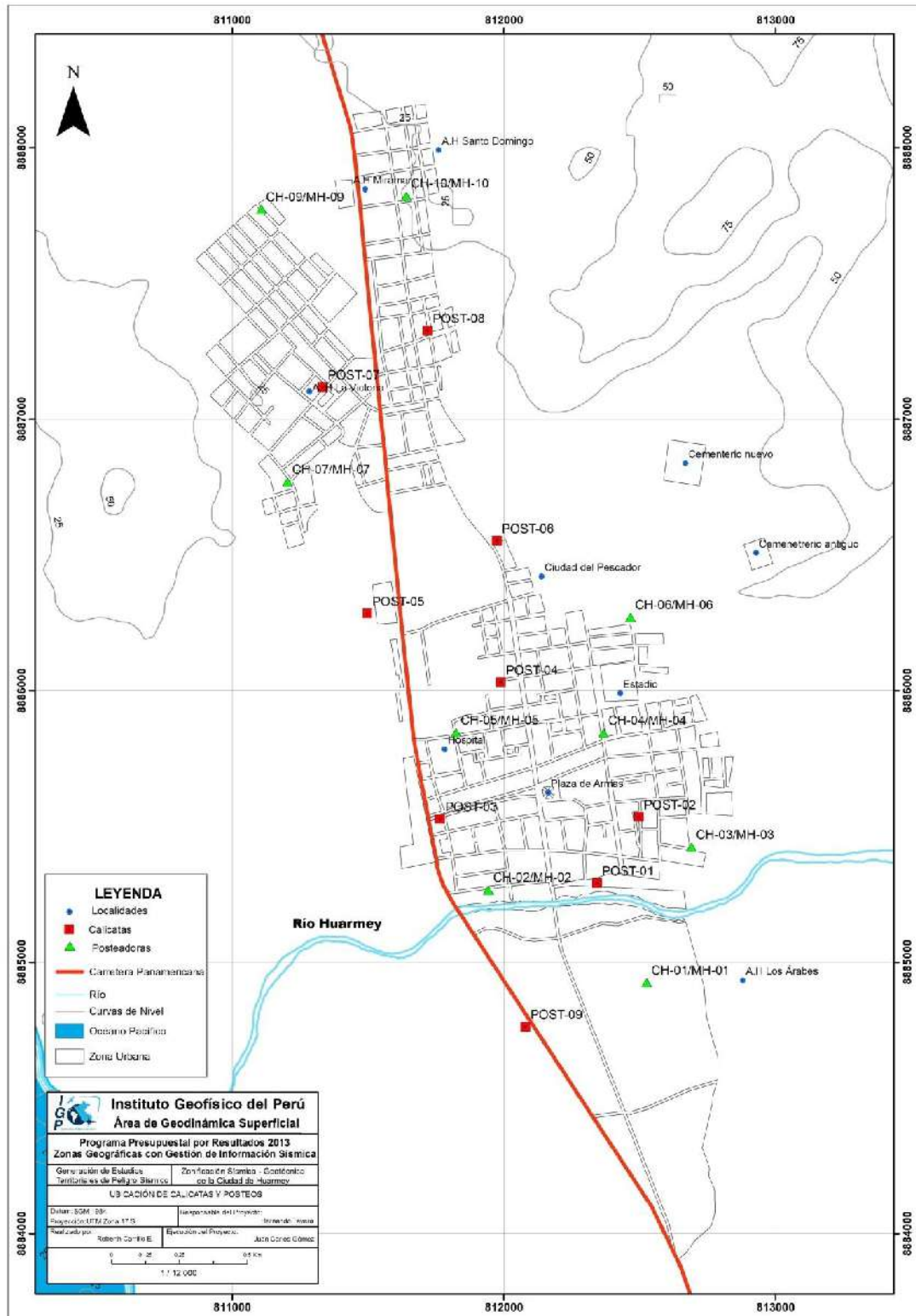


Figura 44: Mapa de ubicación de calicatas y puntos de posteo de suelos en la ciudad de Huarney

Tabla 2: Clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Huarmey

CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	NIVEL FREÁTICO (m)	GRAVAS % (>4.76 mm)	ARENAS % (>0.074 mm, <4.76 mm)	FINOS % (<0.074mm)	UNIFORMIDAD	CURVATURA	LÍMITE		ÍNDICE PLÁSTICO	CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	CLASIFICACIÓN SUCS	DENOMINACIÓN
								LIQUIDO (%)	PLÁSTICO (%)				
CH-01/MH-01	2.60	2.60	0	28	72	-	-	33.93	20.79	13.14	28.78	CL	Arcillas limosas
CH-02/MH-02	2.20	2.10	0	93	7	2.00	1.3	NT	NP	NP	30.17	SP-SM	Arenas limosas
CH-03/MH-03	2.75	NP	0	42	58	-	-	27.75	21.68	6.07	20.57	CL-ML arenoso	Arcillas y limos inorgánicos
CH-04/MH-04	2.80	NP	0	65	35	-	-	NT	NP	NP	14.67	SM	Arenas limosas
CH-05/MH-05	2.50	NP	0	53	47	-	-	24.68	19.87	4.81	18.47	SC-SM	Arenas arcillo limosas
CH-06/MH-06	2.40	NP	0	71	29	-	-	NT	NP	NP	10.73	SM	Arenas limosas
CH-07/MH-07	1.95	NP	2	94	4	2.03	0.84	NT	NP	NP	1.31	SP	Arenas mal graduadas
CH-08/MH-08	2.10	2.10	0	2	98	-	-	43.21	23.41	19.8	42.15	CL	Arcillas limosas
CH-09/MH-09	2.20	NP	25	69	6	23.02	0.44	NT	NP	NP	2.38	SP-SM	Arenas limosas mal graduadas
CH-10/MH-10	1.50	NP	19	68	13	-	-	NT	NP	NP	3.85	SM con grava	Arenas limosas con gravas

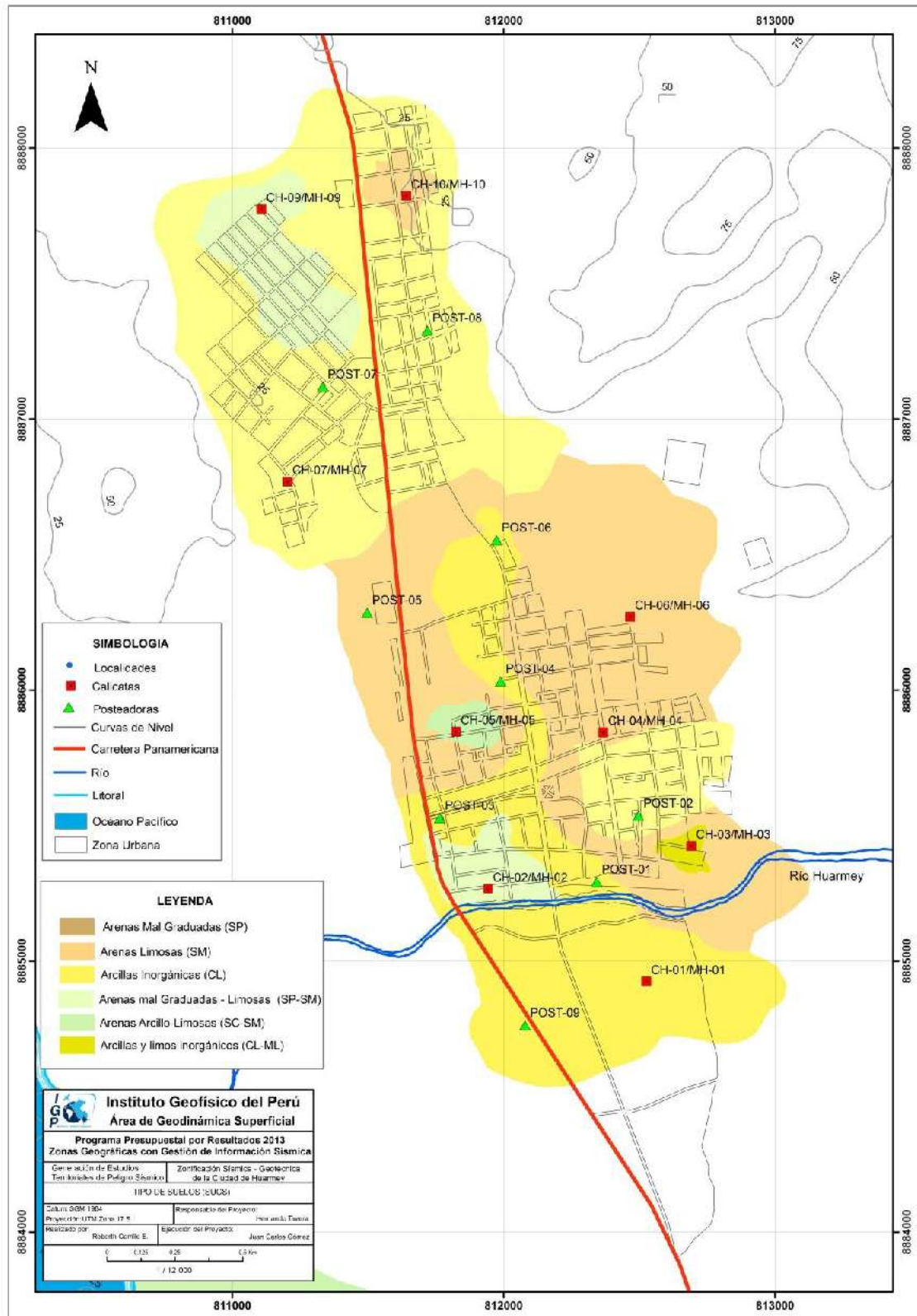


Figura 45: Mapa de clasificación SUCS de suelos en la ciudad de Huarney

- Suelos tipo SP: Arenas mal graduadas con grava y poco contenido de material fino. Ocupan el 37 % del terreno de la ciudad. El contenido de humedad es de 1.31%, no presentan plasticidad y constituyen suelos compactos. Estos suelos están presentes en los A.H La Victoria, Miramar, Santo Domingo y en menor proporción, en las inmediaciones de la zona urbana.

- Suelos tipo SM: Conformados por arenas limosas, mezcladas con arena y limo mal graduados. Ocupan el 32.56 % del terreno de la ciudad. El contenido de humedad es de 10.73 % a 14.67 %; sin embargo, en la calicata CH10-MH-10 el porcentaje de humedad es de 3.85% y se debe a la presencia de gravas. Son suelos semicompactos y no presenta plasticidad. Estos suelos han sido identificados en la parte central del casco urbano y en menor proporción en A.H Miramar.

- Suelos tipo CL: Conformados por arcillas inorgánicas, arcillas limosas o arcillas arenosas y ocupan el 22.07 % del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 28.78% a 42.15%; por lo tanto, se considera que su capacidad de retención (permeabilidad) es moderada. Son suelos inconsolidados o sueltos que presentan plasticidad de ligera a baja (de 13.4 % a 19.8%). Estos suelos han sido identificados en el extremo sur de la ciudad, en las inmediaciones del río Huarmey (A.H Los Árabes) y en pequeñas capas en el extremo norte de la Av. Olivar.

- Suelos tipo SP-SM: Corresponden a arenas limosas mal graduadas con presencia de gravas. El contenido de humedad es de 2.38% (suelos compactos) a 30-17% (suelos blandos), este último se debe a que el nivel freático en la zona se encuentra a 2.10 m de profundidad. No presentan plasticidad y han sido identificados en el extremo norte del A.H La Victoria y en las inmediaciones del río Huarmey. Estos suelos ocupan el 6.58 % del terreno de la ciudad.

- Suelos tipo SC-SM: Corresponden a arenas arcillo-limosas mal graduadas y ocupan el 1.11% del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 18.47% y presentan ligera plasticidad (4.81%). Estos suelos se encuentran en las inmediaciones del Hospital de Huarmey.

- Suelos tipo CL-ML: Constituidos por arcillas y limos inorgánicos con presencia de arena y ocupan menos del 1% del área de la ciudad. El contenido de humedad es de 20.57% y presentan plasticidad ligera (6.07%). Estos suelos se encuentran en el extremo este de la ciudad de Huarmey.

10.2.- Capacidad Portante

Para conocer la capacidad portante del suelo, se realizaron los ensayos de corte directo al material muestreado en las 10 calicatas elaboradas en la ciudad de Huarmey. Los valores obtenidos en laboratorio corresponden a una profundidad de cimentación de 1.20 metros y ancho de 1.0 metros (Tabla 4). Estos valores fueron clasificados en rangos que definen la capacidad portante del suelo de media a muy alta (Tabla 5).

Tabla 4: Valores de capacidad portante para las calicatas elaboradas en la ciudad de Huarmey

CALICATAS	ANGULO DE FRICCIÓN INTERNA DEL SUELO (°)	COHESIÓN APARENTE DEL SUELO (kg/cm ²)	DENSIDAD SECA PROMEDIO DEL SUELO γ^d (gr/cm ³)	HUMEDAD NATURAL DEL SUELO (%)	CAPACIDAD DE CARGA ADMISIBLE (Kg/cm ²)
CH-01/MH-01	22.87	0.1	1.4	28.78	0.77
CH-02/MH-02	27.49	0	1.6	30.17	1.35
CH-03/MH-03	24.89	0.06	1.6	20.57	1.04
CH-04/MH-04	27.03	0.02	1.6	14.64	1.30
CH-05/MH-05	25.87	0.05	1.6	18.47	1.16
CH-06/MH-06	26.87	0.02	1.55	10.73	1.23
CH-07/MH-07	30.11	0	1.7	1.31	1.99
CH-08/MH-08	21.27	0.12	1.45	42.15	0.68
CH-09/MH-09	28.75	0	1.6	2.38	1.58
CH-10/MH-10	29.57	0.01	1.7	3.85	1.86

Tabla 5: Rangos de capacidad portante para la ciudad de Huarmey

Capacidad de Carga (Kg/cm ²)	Denominación
< 1.0	MUY BAJA
1.0 – 2.0	BAJA
2.0– 3.0	MEDIA

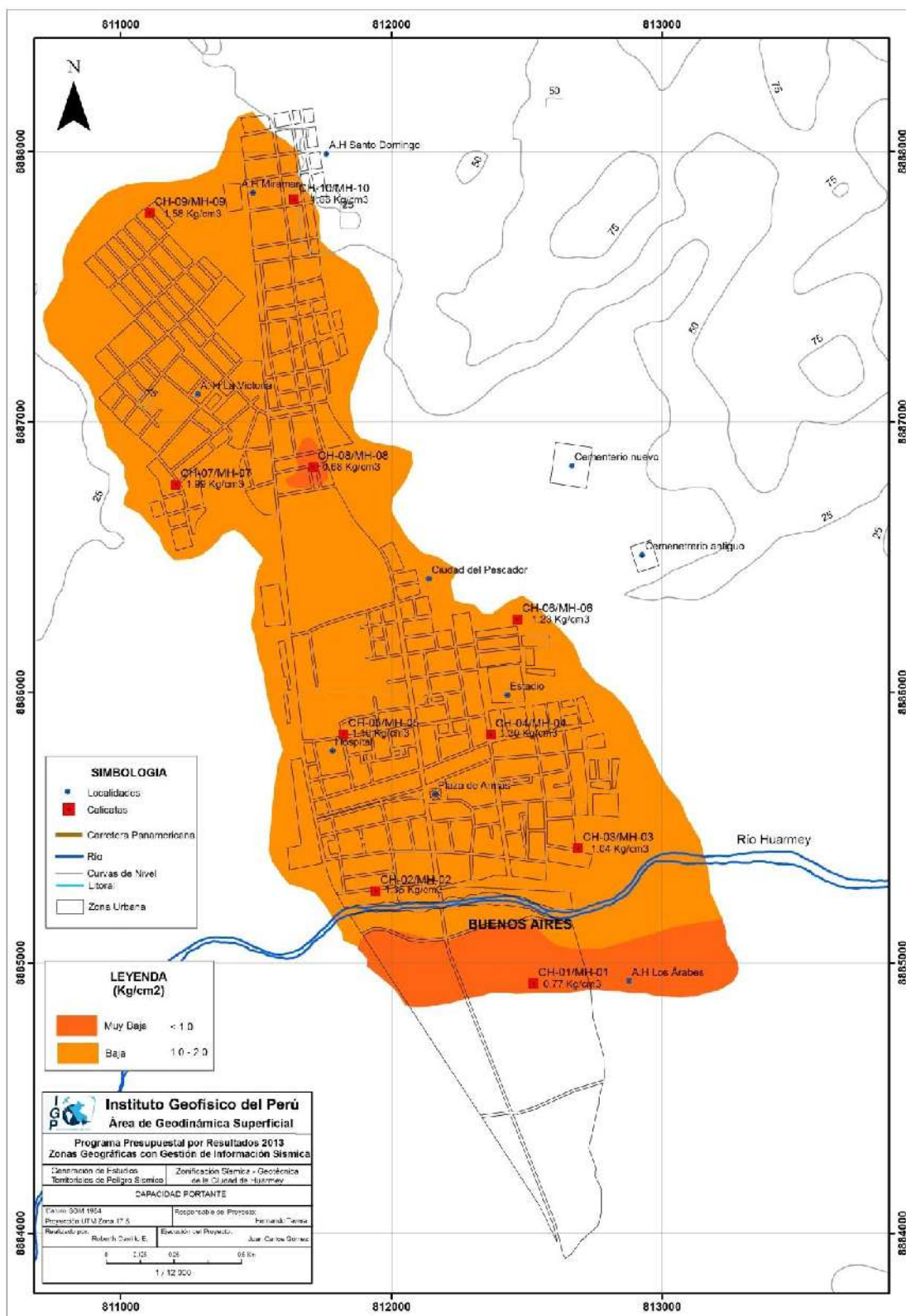


Figura 46: Mapa de capacidad portante en la ciudad de Huarney

Los resultados obtenidos sugieren que en el extremo norte de la ciudad de Huarmey, en los A.H. La Victoria, Santo Domingo, Miramar y el casco urbano, la capacidad portante es baja debido a que corresponden a suelos de consistencia semicomcompacta, permitiendo la cimentación de viviendas de hasta tres pisos. En el extremo sur de la ciudad y en la Urb. Nery, la capacidad portante es muy baja debido a que el nivel freático se encuentra a 2.10 m de profundidad, siendo suelos poco consistentes y susceptibles a asentamientos (Figura 46),

De acuerdo a estudios realizados por INADUR (2000), la capacidad portante en los A.H. Los Árabes y Buenos Aires presentan valores entre 1.5 a 2.5 kg/cm², aunque en dicho informe no se especifica la profundidad de exploración del suelo. Para estas mismas zonas, en este estudio se obtienen valores menores a 1 kg/cm², correspondiendo a suelos de baja a muy baja capacidad portante.

10.3.- Nivel Freático Superficial

La información geotécnica (calicatas y posteo) ha permitido determinar la profundidad del nivel freático superficial en la ciudad de Huarmey; es decir, la profundidad a la cual se encuentra la capa o suelo saturado. Esta información es importante debido a que la presencia de agua y su relación con los esfuerzos de corte producidos por sismos por ejemplo, produce una disminución en las propiedades de resistencia de los suelos, dando como resultados variados escenarios de licuación de suelos.

Tabla 6: Registros del nivel freático superficial a partir de datos geotécnicos

PUNTO	COORDENADAS		COTA	SUCS	NIVEL FREATICO (m)
	E	N			
C-01/CH-01	812526	8884924		CL	2.6
C-02/CH-02	811943	8885266	19	SP-SM	2.10
C-08/MH-08	811711	8886834	17	CL	2.10
POST-01	812343	8885292	22	CL	2.00
POST-02	812497	8885536	16	SP	3.00
POST-03	811765	8885528	21	CL	3.50
POST-05	811497	8886285	21	SM	2.80
POST-06	811974	8886553	20	CL	2.70
POST-09	812079	8884763	19	CL	2.00

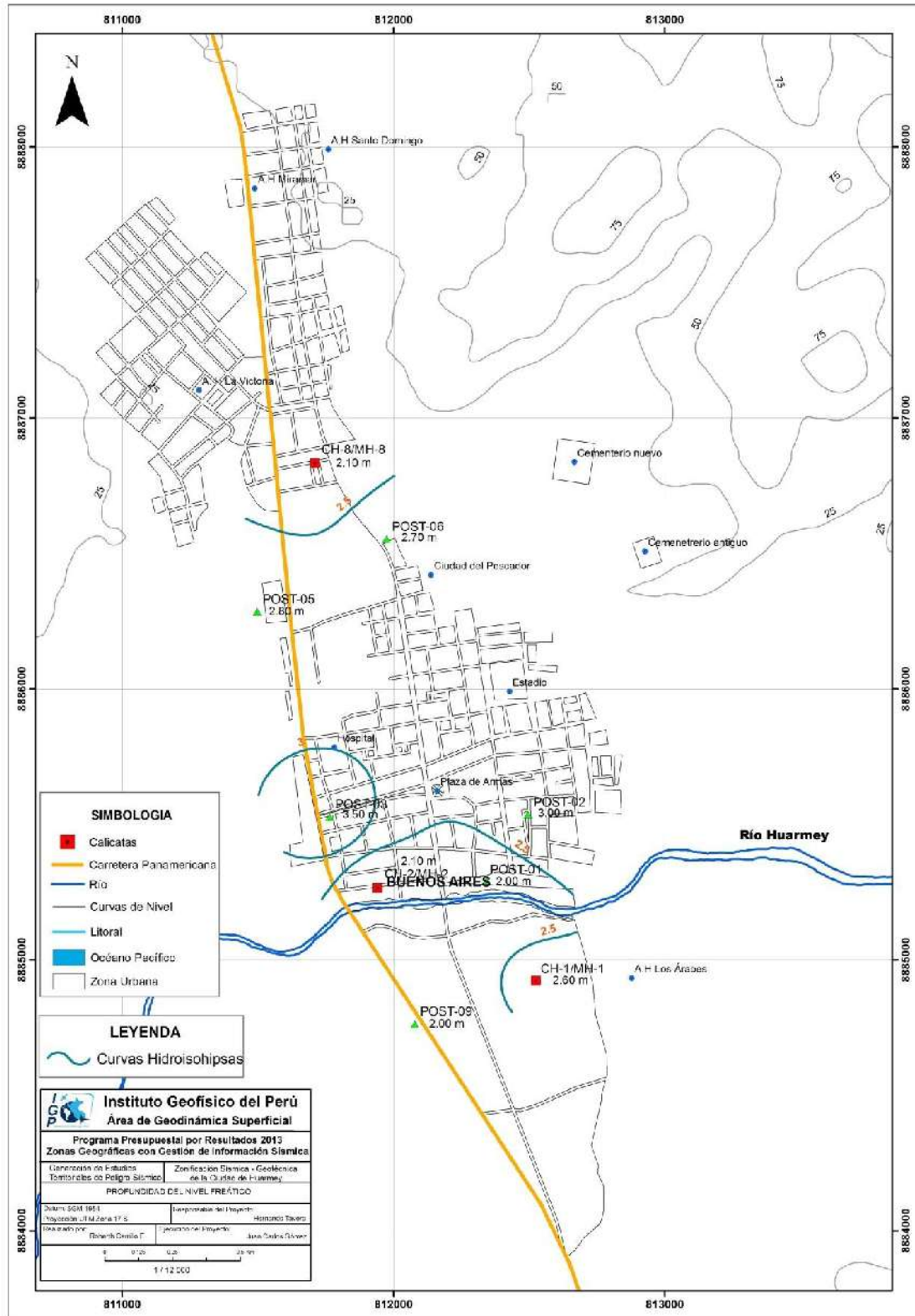


Figura 47: Mapa de nivel freático superficial obtenido para la ciudad de Huarney a partir de datos geotécnicos

Según la Tabla 6 y Figura 47, la profundidad promedio del nivel freático registrado en la ciudad de Huarmey es de 2.53 metros. Los niveles más superficiales (2.0 metros) se encuentran en los A.H. Los Árabes y Buenos Aires (extremo sur de la ciudad); mientras que, los más profundos (3.50 metros) en las inmediaciones de la intersección de la carretera Panamericana Norte con la Av. Alberto Reyes.

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 Huarmey.

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 Huarmey, 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 48 se muestra la distribución espacial de los 230 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 49 se muestra un ejemplo del procedimiento seguido para el punto HMY-58. 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, la frecuencia de 2.1Hz con amplificaciones relativas de hasta 7 veces; 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), o sea 2.1Hz en dirección este-oeste. Este procedimiento de análisis se aplica al total de la información obtenida en campo.

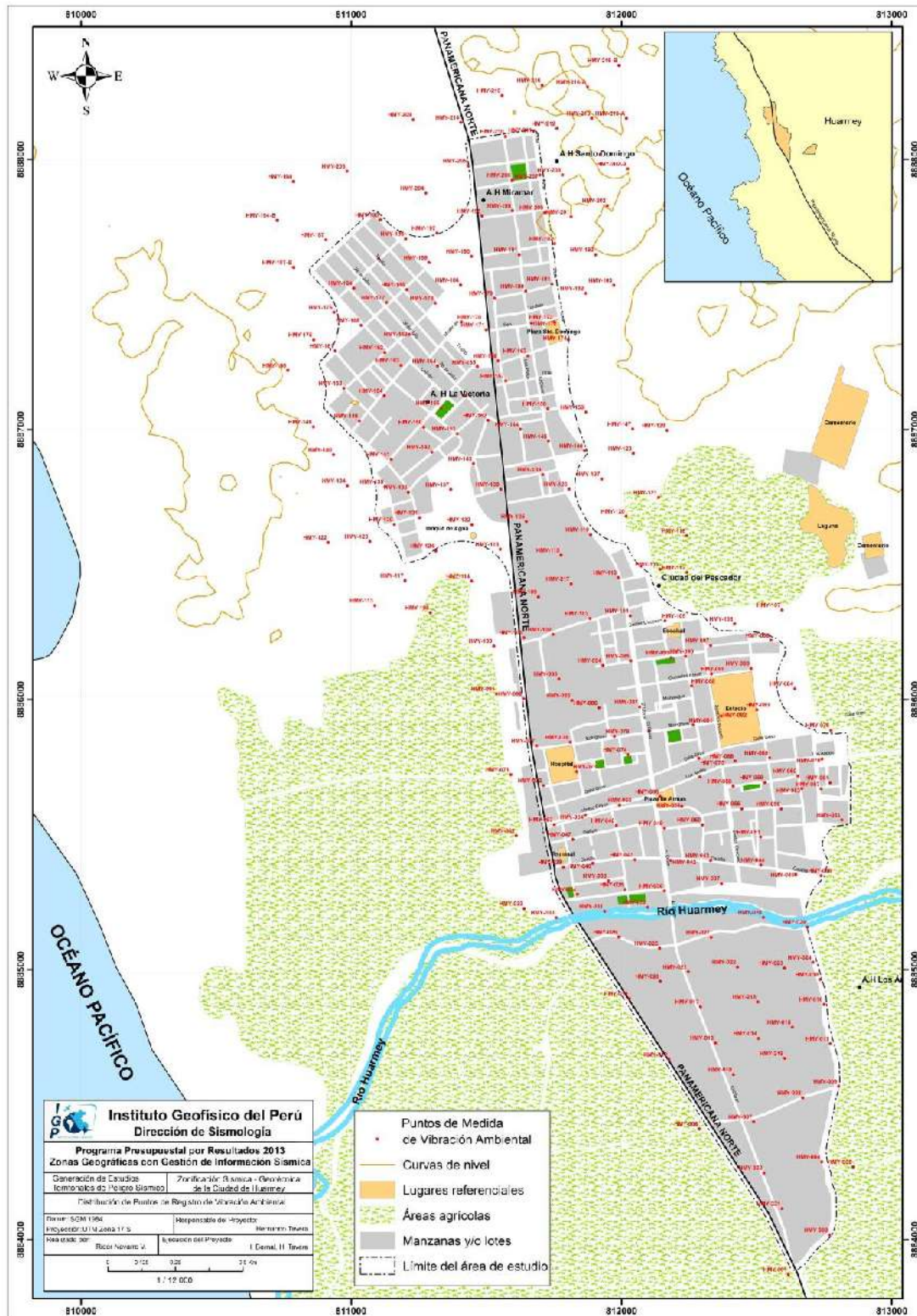


Figura 48: Mapa de la ciudad de Huarney distribución de puntos de registro de vibración ambiental

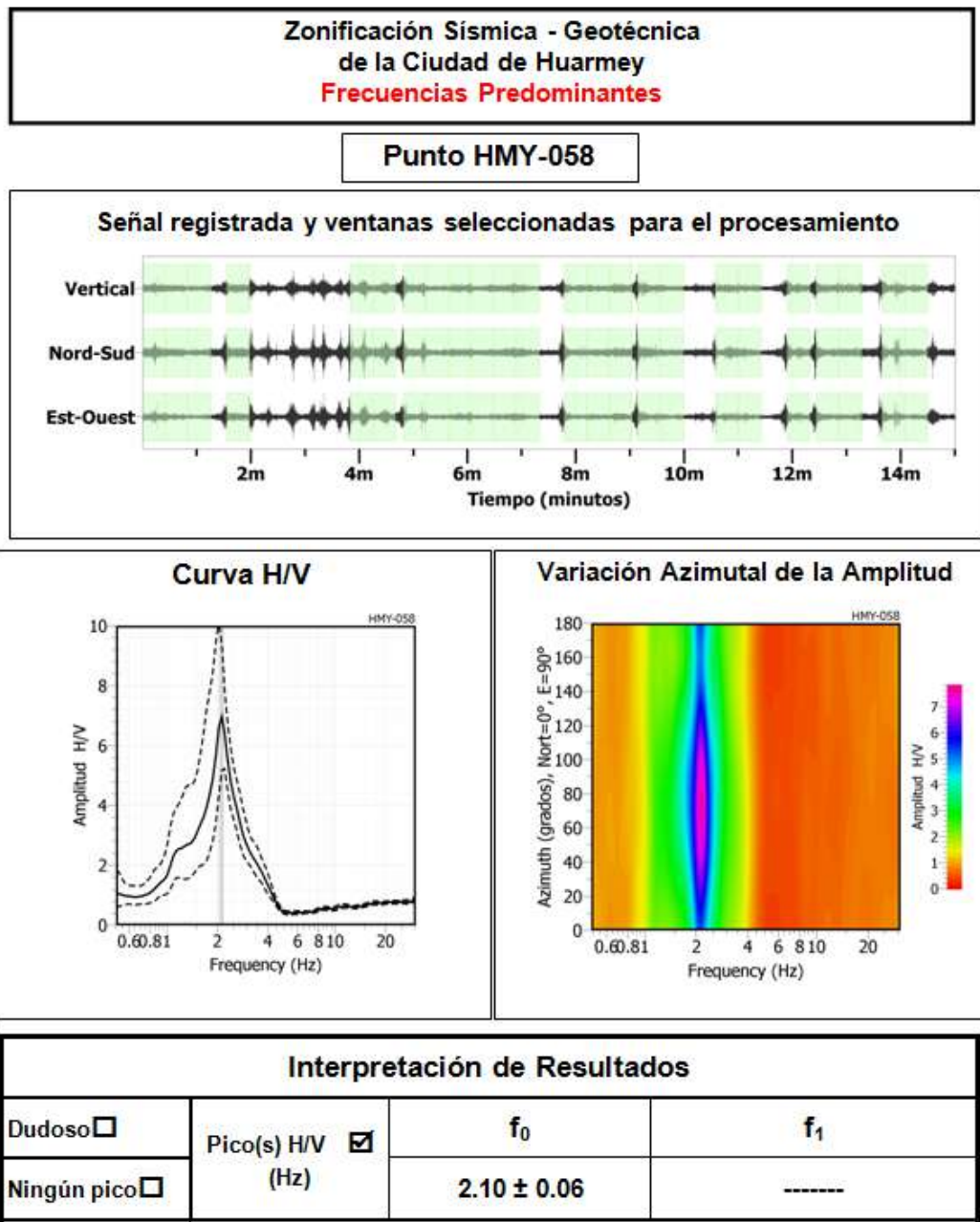


Figura 49: Ejemplo de la ficha H/V para el punto HMY-058 en la cual se recopila la información registrada y analizada. Arriba, señal registrada; Medio; razón espectral (H/V) en línea gruesa y su desviación estándar en línea discontinua. Espectrograma y Abajo: resultados.

.- 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).

A continuación, se describe y analiza la distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas en la ciudad de Huarmey.

En la Figura 50, se observa que los valores de frecuencias predominantes muestran tres agrupamientos: el primero con frecuencias que varían entre 1.0 y 3.0 Hz distribuidas en la zona centro y sur de la ciudad; mientras que, en su extremo norte se agrupan frecuencias entre 3.0 y 4.0 Hz. Asimismo, se observa que en dirección oeste, con respecto al Tanque de Agua Potable, no se han identificado frecuencias predominantes y hacia el extremo NE de la ciudad, las frecuencias que sobresalen presentan amplificaciones bajas, lo cual implica que son zonas más estables con respecto al resto de la ciudad. Finalmente, las frecuencias menores a 1.5 Hz se concentran próximos al río Huarmey con amplificaciones máximas relativas de hasta 9 veces.

En la Figura 51, se presenta ejemplos de razones espectrales seleccionados de manera aleatoria del total obtenido en campo. Estas frecuencias varían entre 1.0 a 5.0 Hz y en algunos casos presentan amplificaciones máximas relativas de hasta 8 veces. La variación de los valores de frecuencias es asociada a cambios en las velocidades de propagación de las ondas de corte en el subsuelo bajo el punto de registro y a los espesores de los estratos que conforman dicho subsuelo.

Las H/V obtenidas para los puntos HMY-21, HMY-32 y HMY-37 ubicados próximos al río Huarmey, muestran frecuencias predominantes que varían entre 1.0 y 1.8 Hz con amplificaciones máximas de hasta 8 veces, y conforme se tiende hacia el extremo norte, cerca de la zona céntrica de la ciudad, los puntos HMY-66, HMY-73 y HMY-104 muestran frecuencias que varían entre 1.5 y 2.0 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 8 veces. Asimismo, en los puntos HMY-68, HMY-93 Y HMY-217 ubicados hacia el norte de la zona céntrica de la ciudad, las frecuencias predominantes varían entre 2.0 y 3.0 Hz con

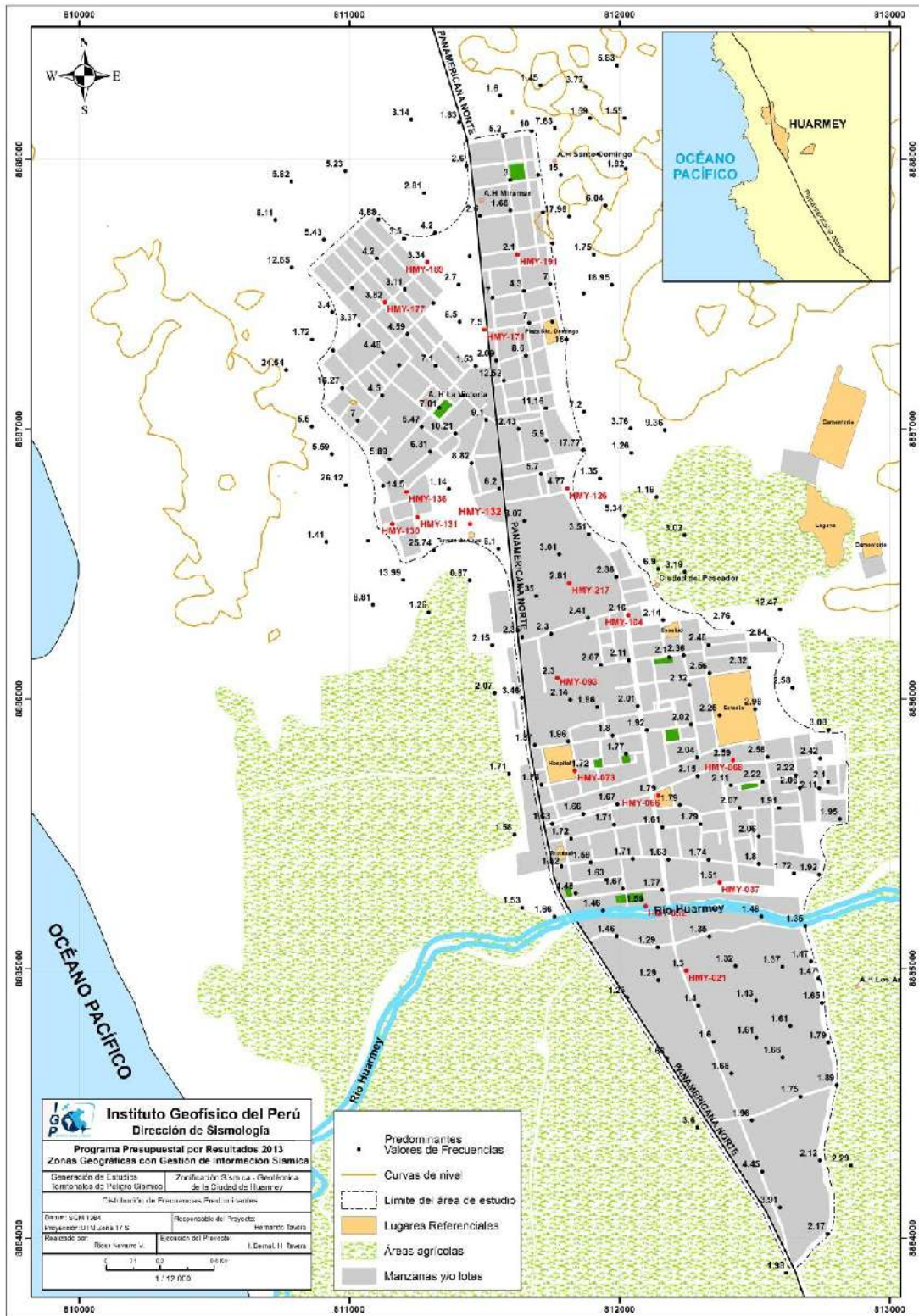


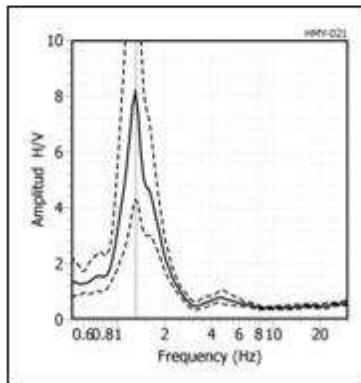
Figura 50: Mapa de la ciudad de Huarney y distribución espacial de las frecuencias predominantes identificadas para cada punto de registro. Los puntos rojos corresponden a las H/V de la Figura 51

amplificaciones máximas relativas de hasta 9 veces. Estos resultados evidencian el incremento en los valores de frecuencias predominantes de sur a norte y sus amplificaciones elevadas, sugieren un mayor grado de flexibilidad de los suelos para cada rango de frecuencias (Figura 51).

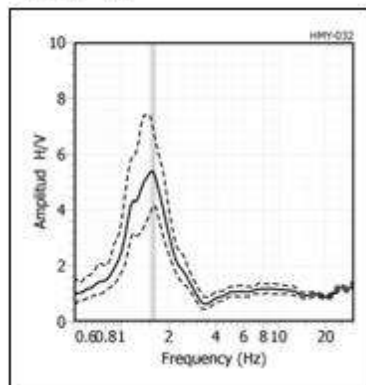
Las H/V obtenidas para los puntos HMY-126, HMY-136 y HMY-171 ubicados en el extremo noroeste de la ciudad de Huarmey muestran incrementos en los valores de frecuencias de 4.0 a 20 Hz (ver Figura 32). En los puntos HMY-126 y HMY-136 predominan frecuencias a 5.0 y 15 Hz con amplificaciones máximas relativas de hasta 6 veces, y en el punto HMY-171, con menor amplificación, se identifica la frecuencia predominante de 8.0 Hz (Figura 51).

Del mismo modo, en el extremo noroeste de la ciudad de Huarmey existen zonas donde las H/V no presentan frecuencias predominantes (puntos HMY-130, HMY-131 y HMY-132): Tanque de Agua Potable de Huarmey. Finalmente, en el extremo noreste de la ciudad existe un área pequeña donde las frecuencias predominantes fluctúan entre 3.0 y 4.0 Hz pero con amplificaciones bajas: puntos HMY-177, HMY-189 y HMY-191. Este escenario sugiere que los suelos son estables con respecto al resto de la ciudad (Figura 51).

HMY-21



HMY-32



HMY-37

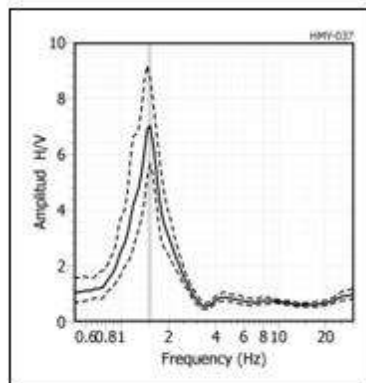
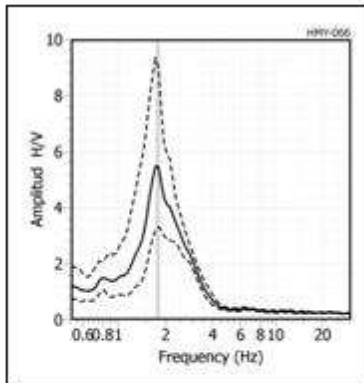
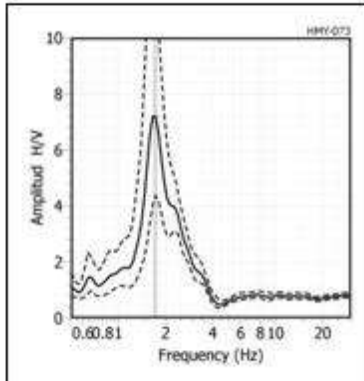


Figura 51: Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados próximos al río Huarmey. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

HMY-66



HMY-73



HMY-104

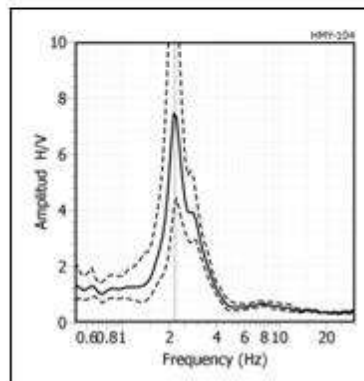


Figura 51: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en la zona céntrica de la ciudad de Huarney. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

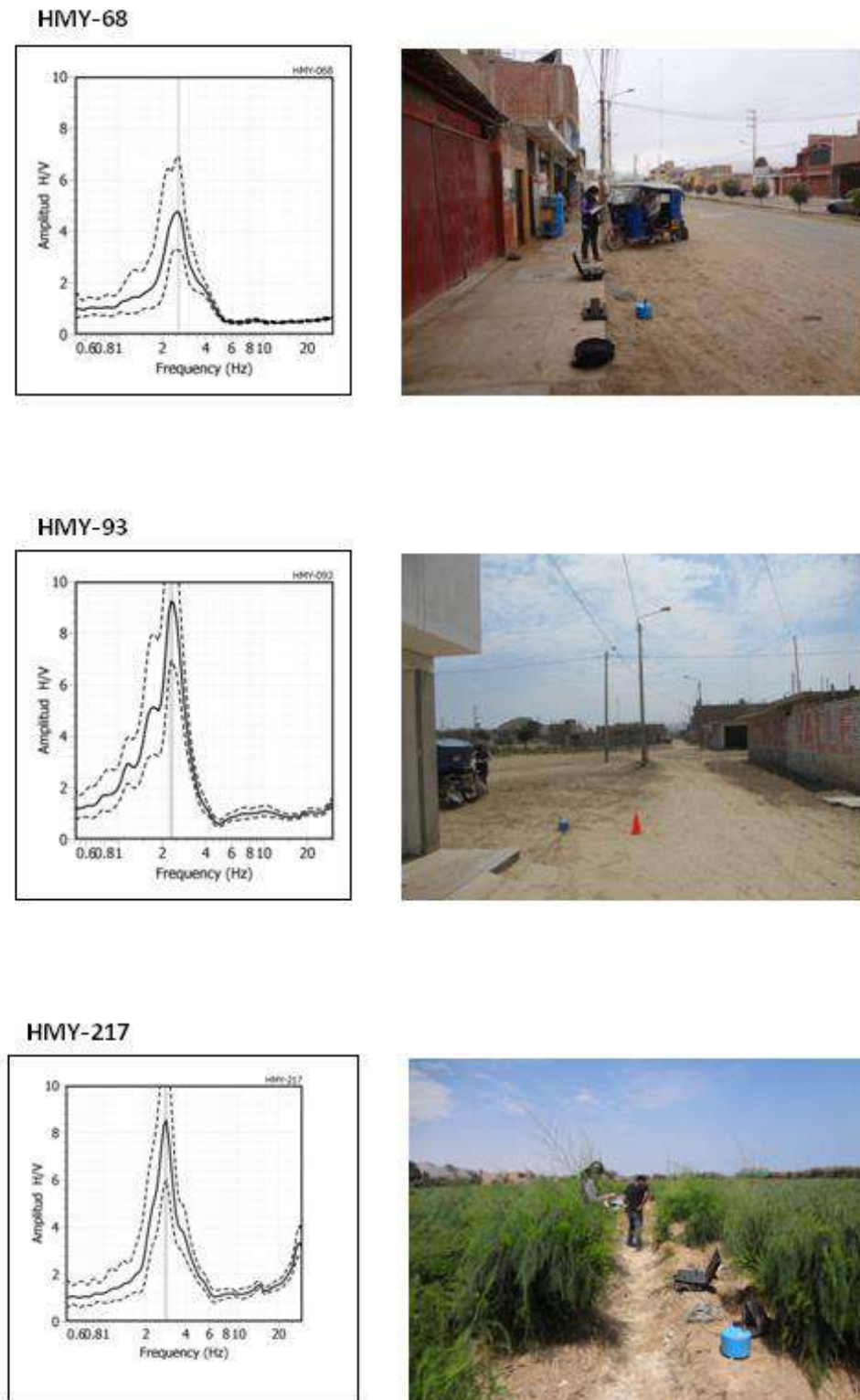


Figura 51: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el extremo norte de la ciudad de Huarmey. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

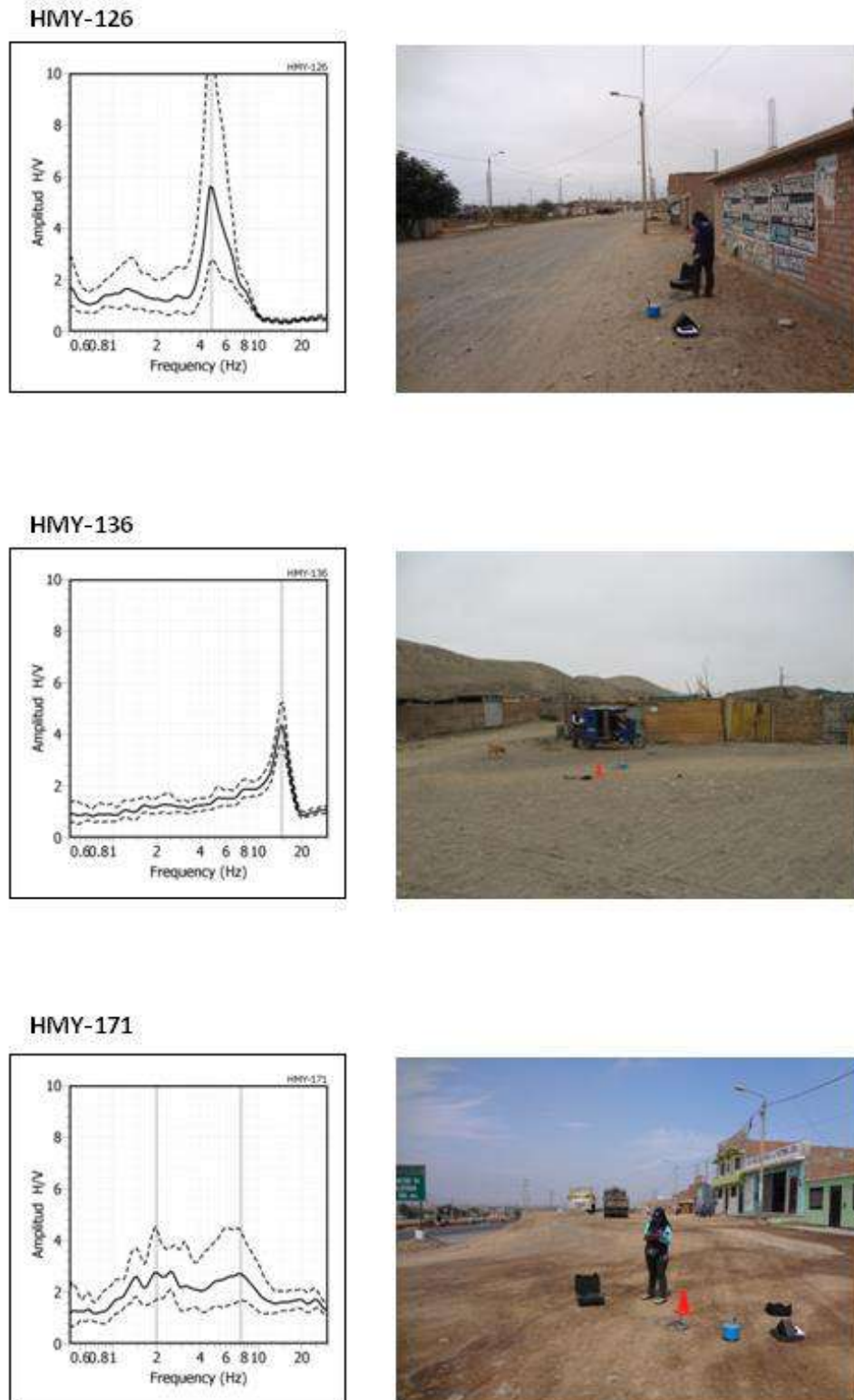


Figura 51: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el extremo NO de la ciudad de Huarmey. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

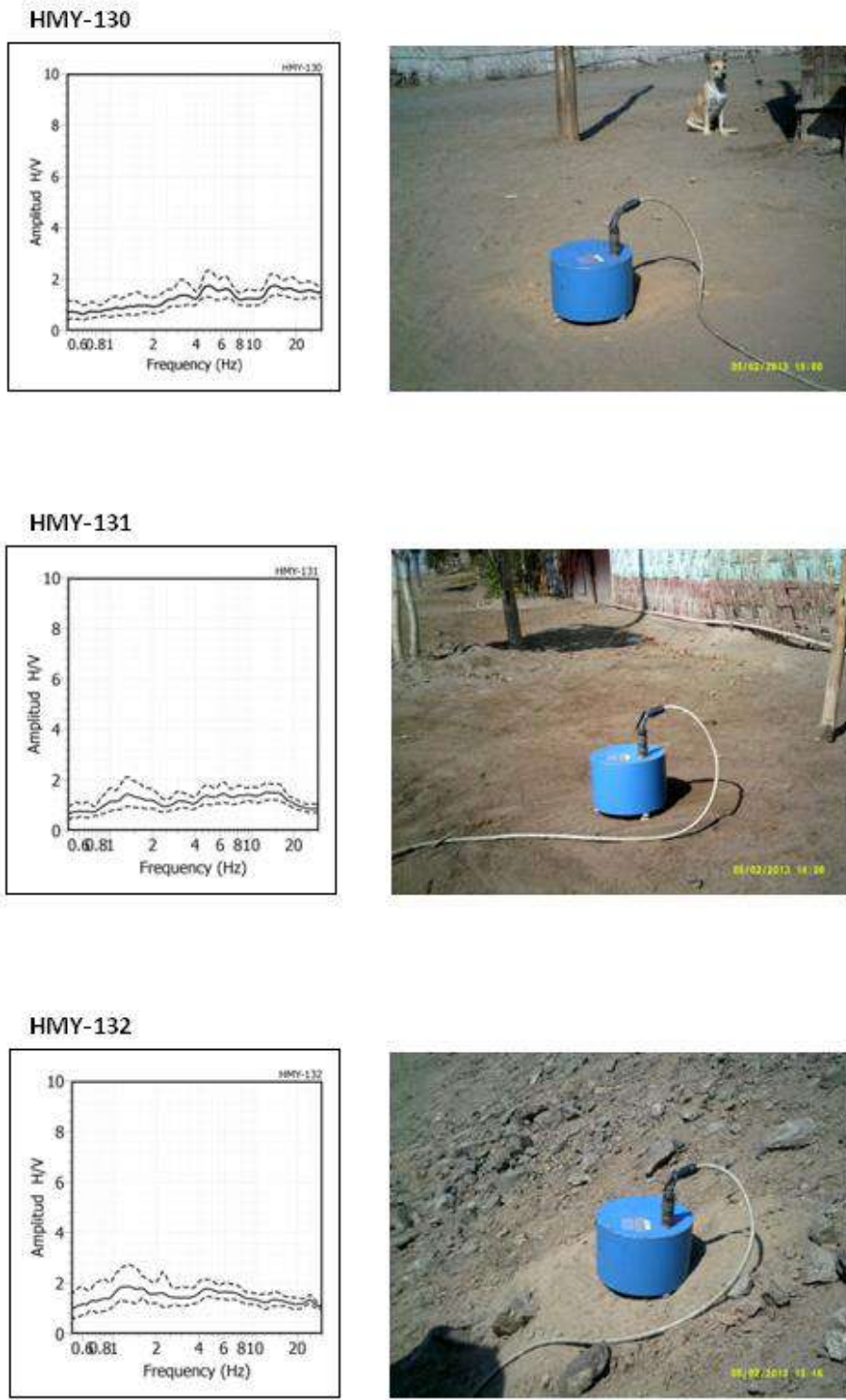


Figura 51: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en dirección oeste del Tanque de Agua Potable de Huarney. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. No se identifican frecuencias predominantes.

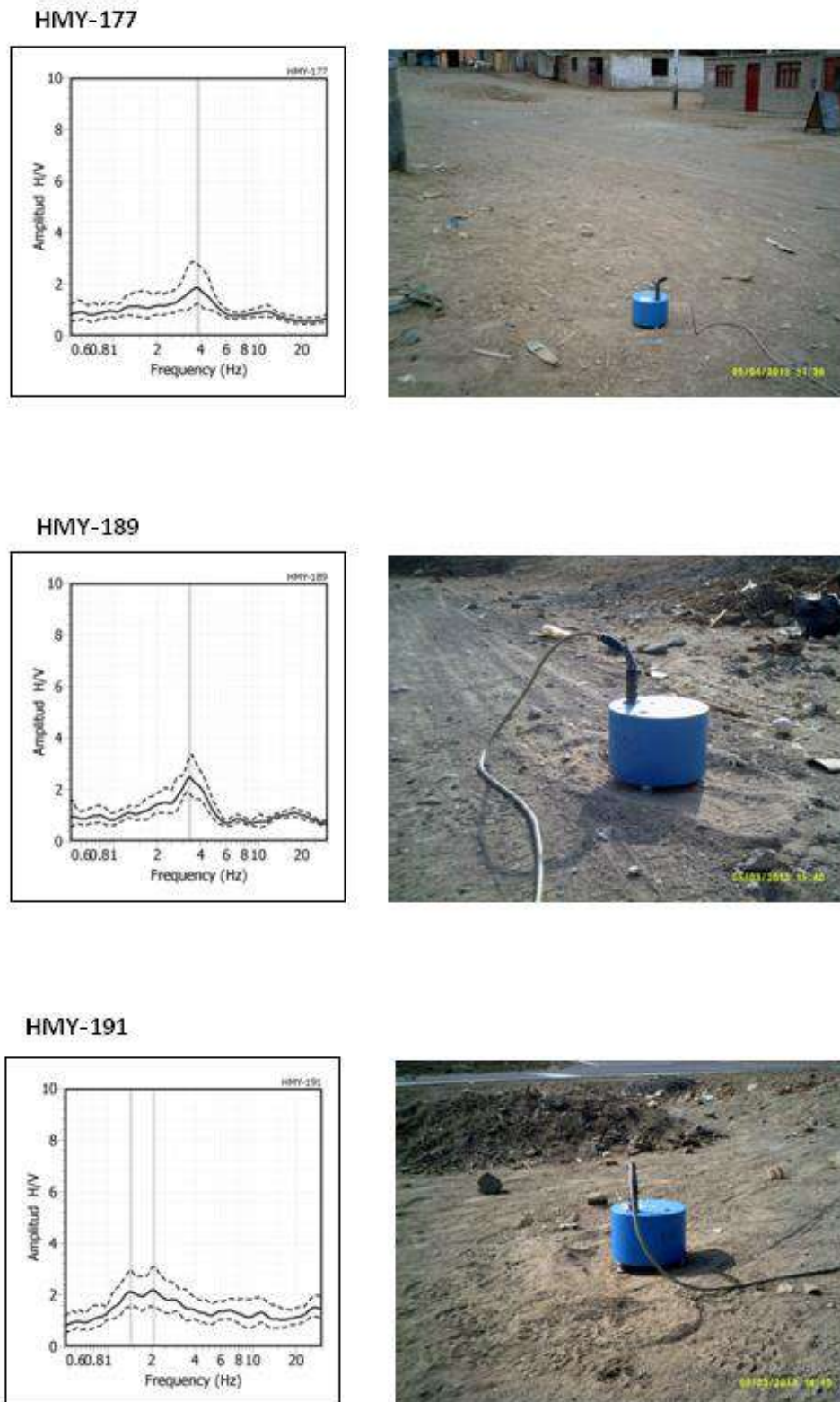


Figura 51: Continuación.../ Ejemplos de razones espectrales (H/V) para puntos ubicados en el extremo NE de la ciudad de Huarney. Las líneas continuas representan la razón espectral y las discontinuas su desviación estándar. Las barras grises, definen la frecuencia predominante.

11.2.-Periodos Dominantes

Los valores finales obtenidos con H/V fueron transformados de frecuencias predominantes a periodos dominantes y para facilitar su análisis, se ha preparado mapas considerando, para cada punto, radios de confiabilidad de 10 metros, lo cual facilito la identificación de zonas con similares valores de periodos dominantes. En la Figura 52 se presenta el mapa de periodos dominantes y en ella, los valores fueron agrupados en zonas que consideran periodos mayores, menores o iguales a 0.3 segundos (zonas demarcadas con línea punteada).

Los periodos mayores a 0.3 segundos se distribuyen principalmente, entre el centro de la ciudad y el río del mismo nombre, los mismos que tienden a incrementarse hasta alcanzar valores de 0.7 segundos hacia el margen derecho del río y hasta 0.8 segundos, hacia su margen izquierda. Estos valores sugieren la presencia de capas superficiales de sedimentos cuya potencia es mayor próximo al río y conforme se tiende hacia el extremo norte de la ciudad, disminuye. Asimismo, hacia el extremo norte de la Plaza Sto. Domingo (extremo norte de la ciudad), en un área pequeña se identifica la presencia de periodos que fluctúan entre 0.4-0.7 segundos con amplificaciones muy bajas. Los periodos menores e iguales a 0.3 segundos se distribuyen hacia el extremo NO de la ciudad de Huarmey y sugieren la presencia de capas superficiales de poco espesor fuertemente influenciadas por la existencia de una capa profunda de mayor espesor que acondiciona la dinámica local del subsuelo.

Los periodos dominantes están relacionados con las condiciones físico-dinámicas del suelo 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 una velocidad de 160 m/s y 180 m/s para las ondas de corte (V_s) y periodos de 0.7 segundos, se estima para la capa superficial espesores entre 20 y 28 metros. Para velocidades de 400 m/s y periodos de 0.2 y 0.3 segundos, se estima espesores de 20 y 30 metros. Estos valores para los espesores de las capas superficiales son reconfirmados con los obtenidos a partir de los perfiles sísmicos usando la técnica de arreglos.

El mapa de distribución de periodos dominantes muestra la presencia de dos zonas con suelos de características dinámicas diferente: la primera es definida por la distribución de periodos mayores a 0.3 segundos, presentes entre el centro de la

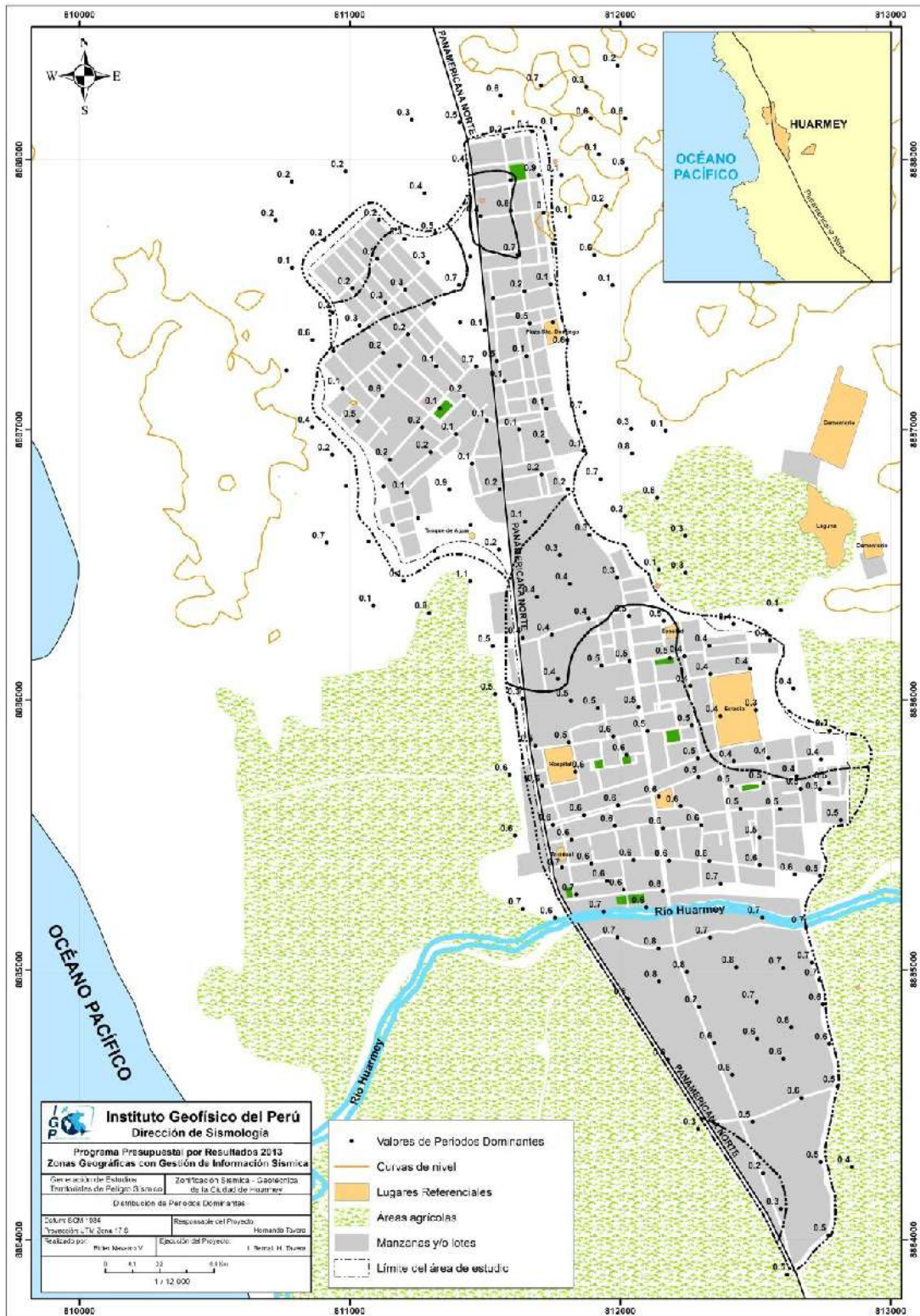


Figura 52: Mapa de la ciudad de Huarney y distribución espacial de los valores de periodos dominantes.

ciudad y el río del mismo nombre, correspondiendo a la existencia de una capa de suelos relativamente uniforme de 20 metros de espesor aproximadamente que domina el comportamiento dinámico del suelo. La segunda zona presenta periodos dominantes menores e iguales a 0.3 segundos distribuidos en el extremo norte de la ciudad, correspondiendo a la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por una capa profunda de mayor espesor, la cual genera efectos dinámicos especiales sobre esta.

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 53, se presenta el mapa de la ciudad de Huarmey con la distribución espacial de 6 líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-HMY,.. , LR06-HMY. En la Figura 54, 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

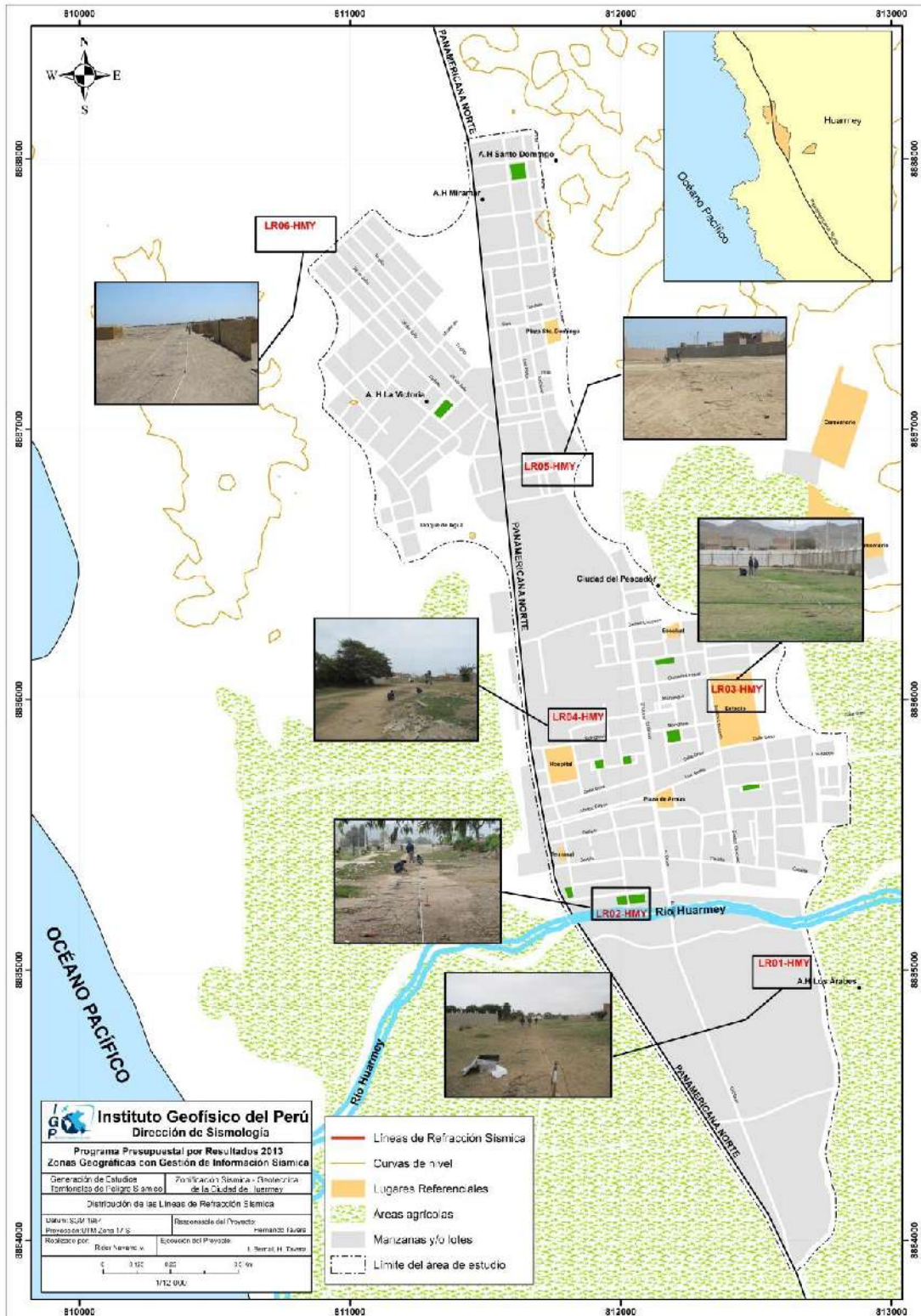


Figura 53: Mapa de la ciudad de Huarney y distribución espacial de las líneas de refracción sísmica codificadas como: LR01-HMY, ..., LR06-HMY.

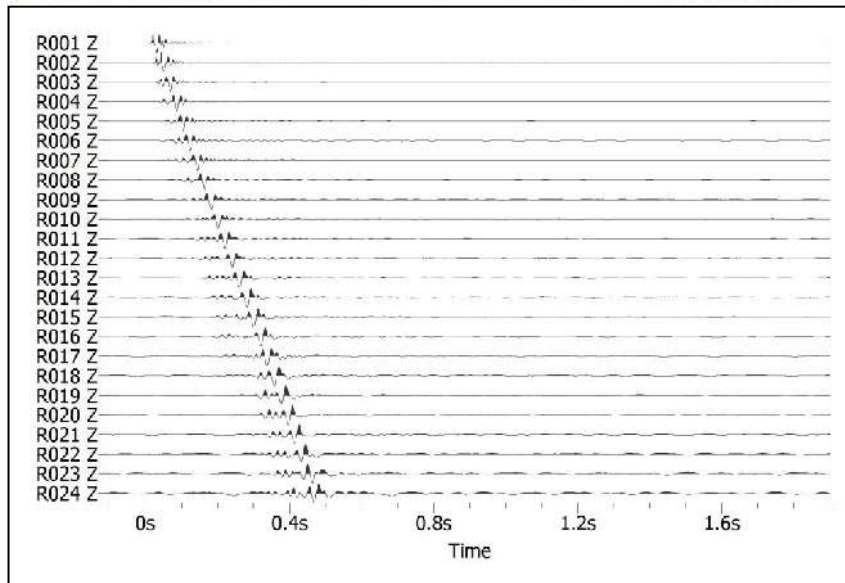


Figura 54: Disposición del equipo de refracción sísmica y registros obtenidos en la ciudad de Huarmey.

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

Arreglos Lineales LR01-HMY y LR02-HMY: Ambos arreglos fueron realizados en el extremo sur de la ciudad: LR01-HMY a 200 metros de la ribera sur del río Huarmey y sobre terrenos de cultivo con una orientación NO-SE; LR02-HRY a pocos metros de la ribera norte del río Huarmey con una orientación este-oeste; es decir, paralelo al río. En estos perfiles se ha identificado la presencia de dos capas, la primera superficial con espesor de 4 metros y velocidades V_s promedio de 140 m/s correspondiente a suelos muy blandos. La segunda capa presenta espesores entre 12 a 18 metros con velocidades V_s alrededor de 170 m/s correspondiente a suelos blandos. El semi-espacio presenta velocidades mayores a los 300m/s. Estos resultados sugieren la existencia de suelos superficiales blandos en el extremo sur de la ciudad de Huarmey (Figura 55a,b).

Arreglos Lineales LR03-HMY y LR04- HMY: Estos arreglos fueron realizados en la zona céntrica de la ciudad de Huarmey, entre la Avenida Santos Chocano y Calle Grau (LR04-HMY, orientación NS), y a 150 metros del Hospital de Huarmey (LR03-HMY, orientación EO). En ambos perfiles se ha identificado la presencia de dos capas, la primera superficial con espesor del orden de 6 metros y velocidades V_s promedio de 160 m/s correspondiente a suelos blandos. La segunda capa presenta espesores entre 16 y 20 metros, y velocidades de 170 a 190 m/s correspondiente a suelos blandos a mixtos, no existiendo cambios definidos en el tipo de suelo. En ambos casos, el semi-espacio presenta velocidades mayores a los 400m/s (Figura 55c,d).

Arreglo Lineal LR05-HMY: Este arreglo se realizó en el extremo NE de la ciudad de Huarmey (orientación NE-SO), identificándose la presencia de dos capas, la primera con espesor de 4 metros y velocidades V_s de 130 m/s correspondiendo a suelos muy blandos. La segunda capa con velocidades V_s de 400 m/s, correspondiente a suelos duros (Figura 55e).

Arreglo Lineal LR06-HMY: Este arreglo se realizó en el extremo NO de la ciudad de Huarmey (orientación NO-SE), identificándose la presencia de dos capas, la primera con espesores de hasta 3 metros y velocidades V_s de 280 m/s correspondientes a suelos duros. La segunda capa presenta espesores de 16 metros y velocidades V_s alrededor de 530 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 55f).

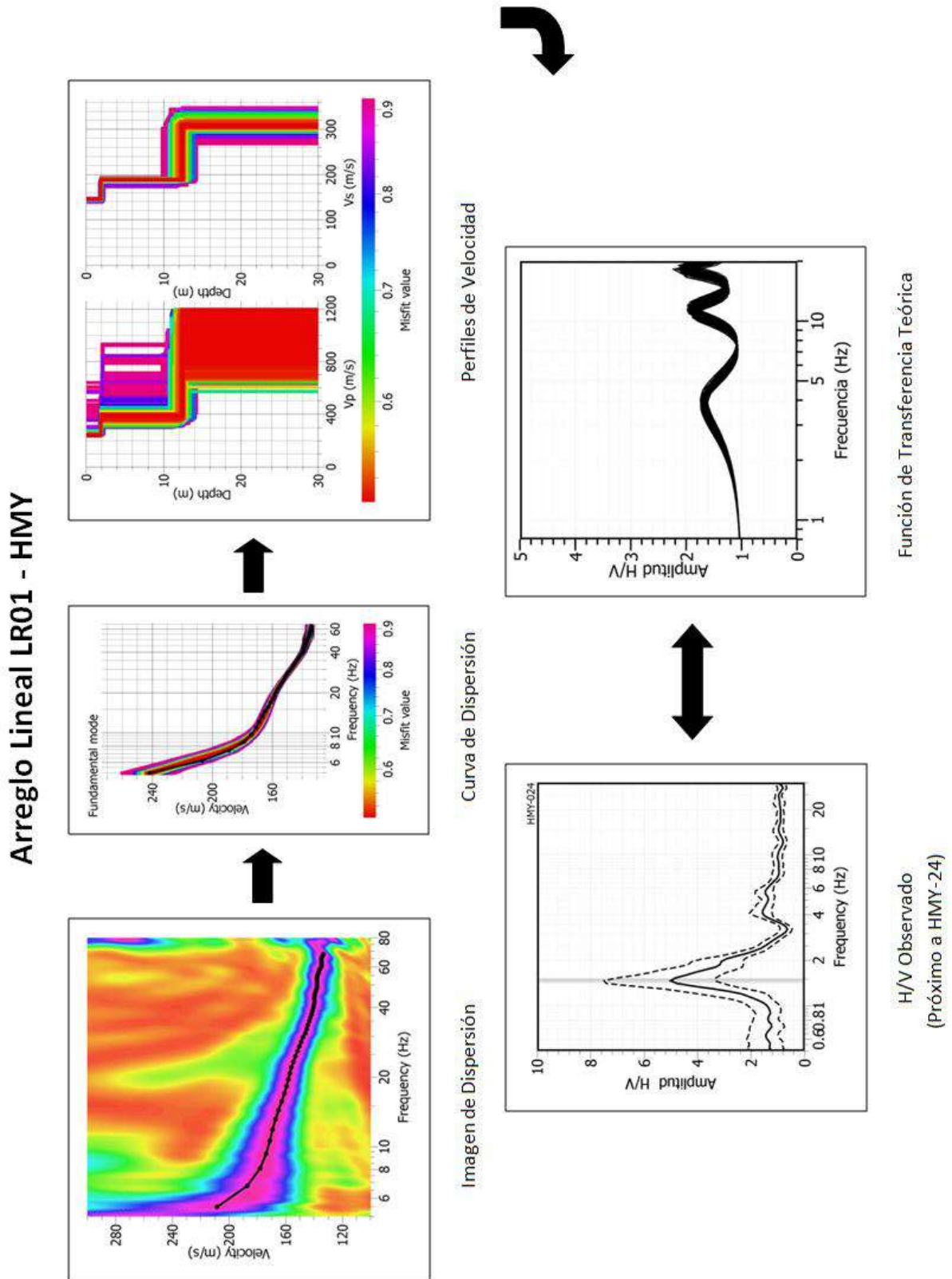


Figura 55: .a) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR01-HMY, próximo al río Huarney (ver Figura 53)

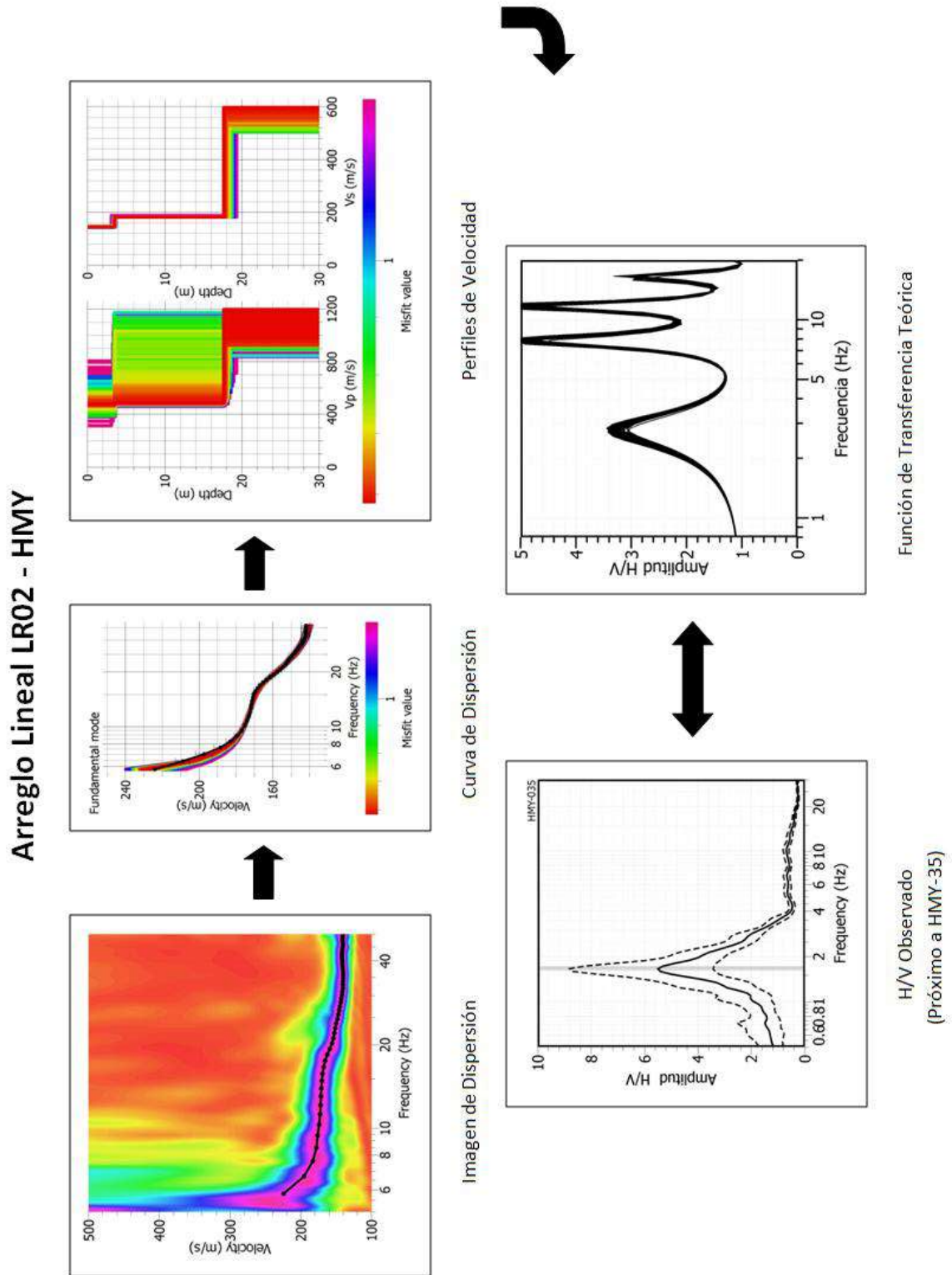


Figura 55: .b) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR02-HMY, próximo río Huarney (ver Figura 53)

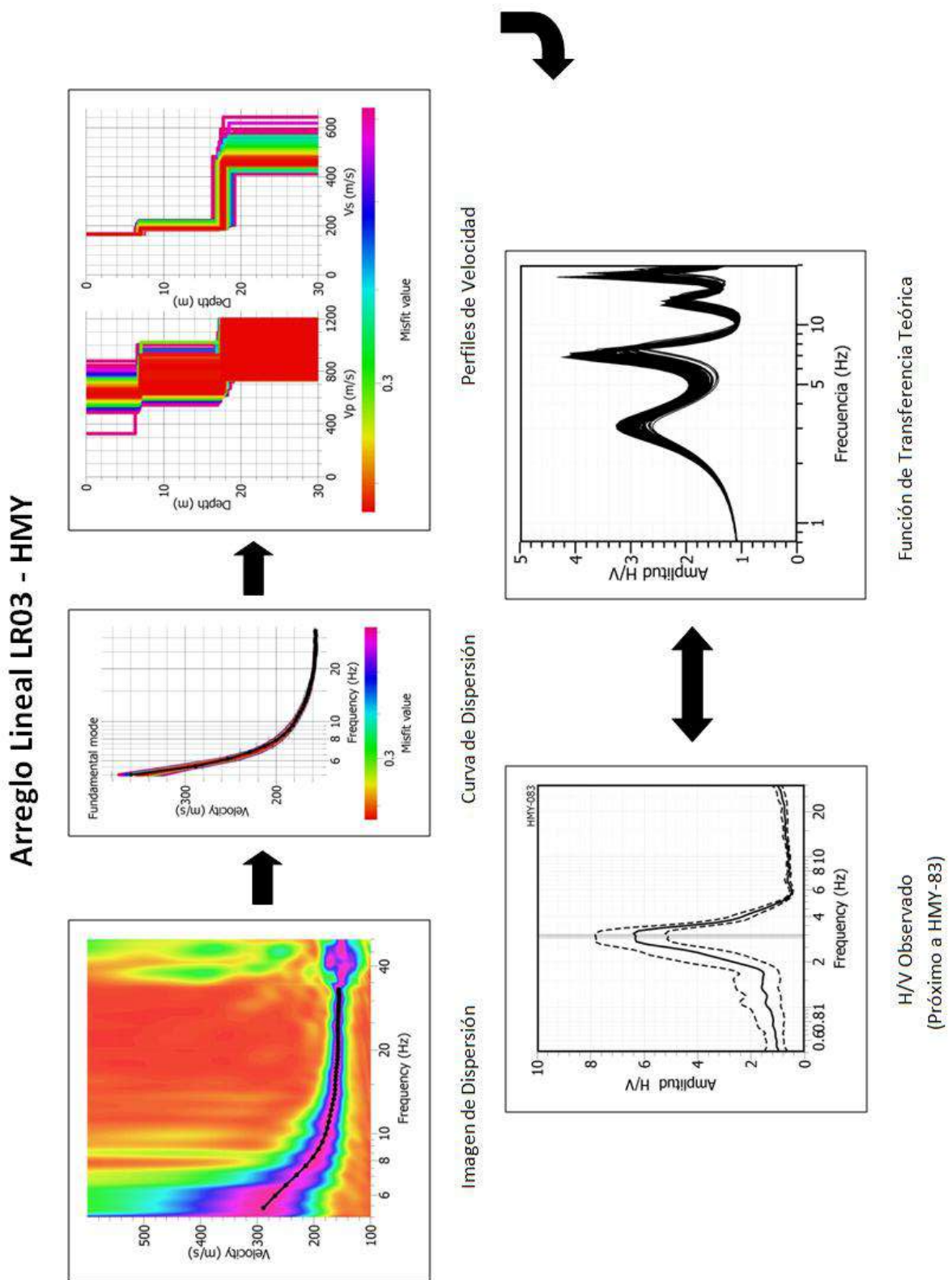


Figura 55.:c) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR03 – HMY, zona céntrica de la ciudad de Huarney (ver Figura 53)

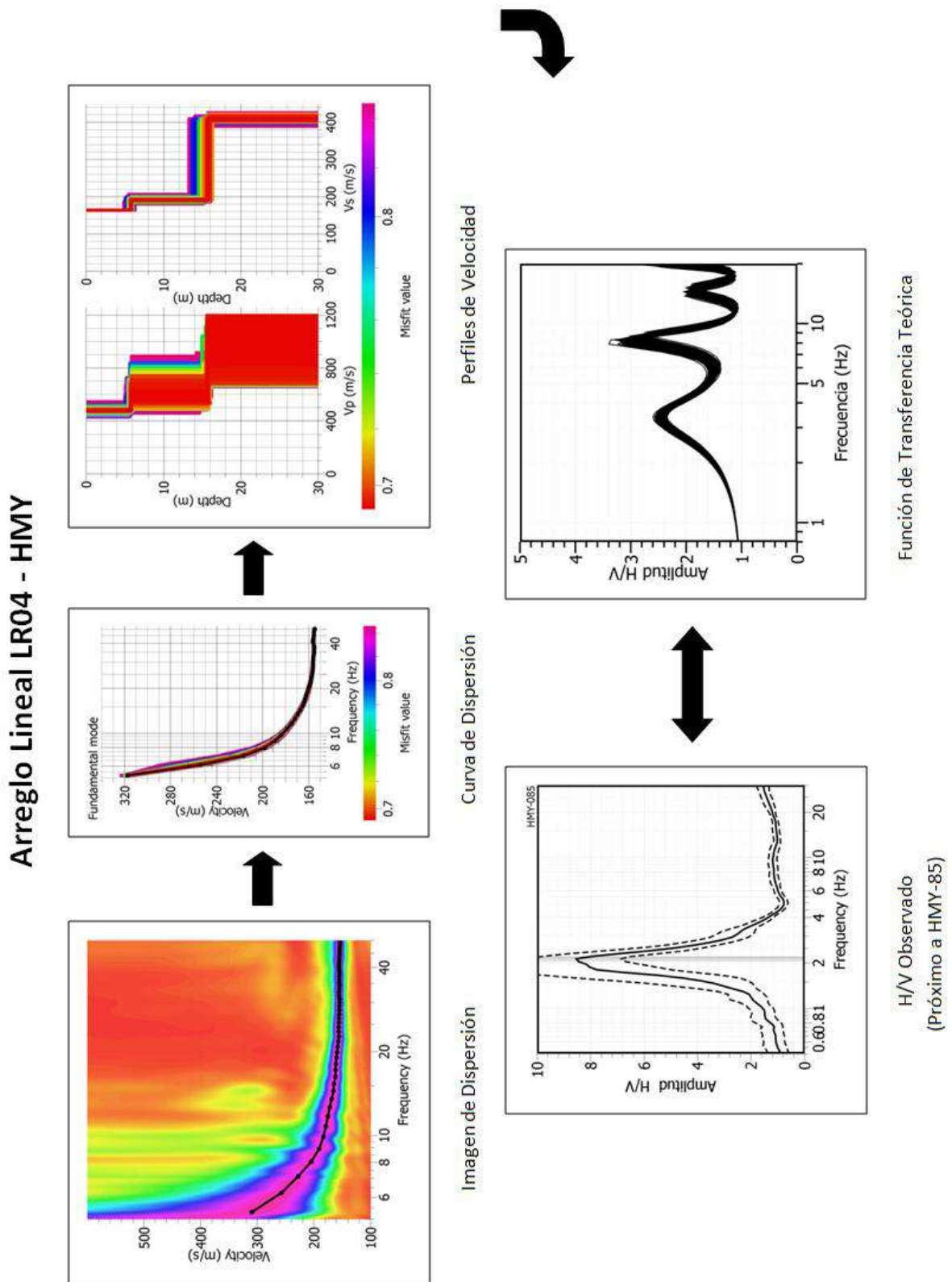


Figura 55: .d) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR04 – HMY, en las cercanías del Hospital de Huarney (ver Figura 53)

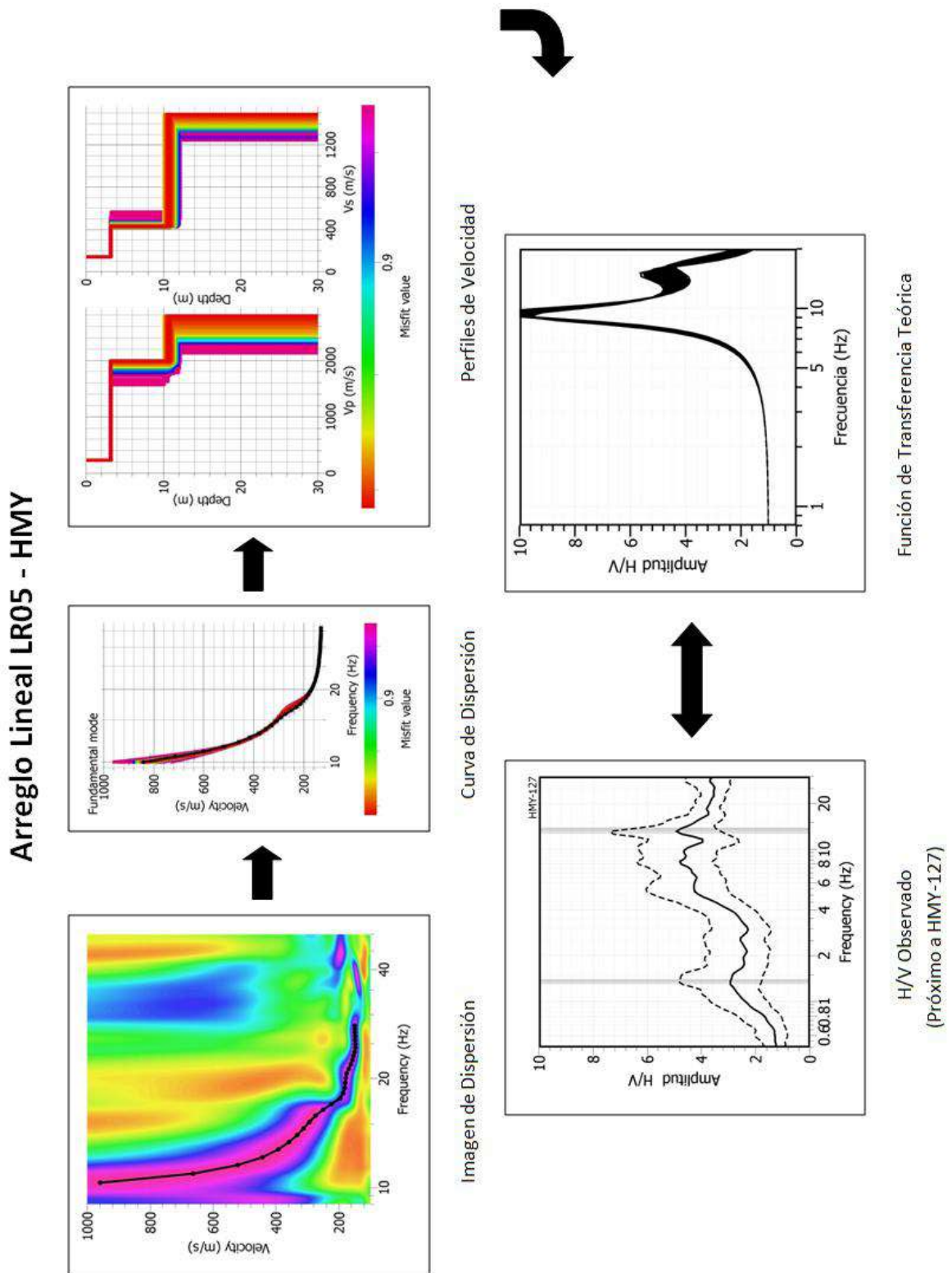


Figura 55.:e) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR05 – HMY, extremo NE de la ciudad de Huarney (ver Figura 53)

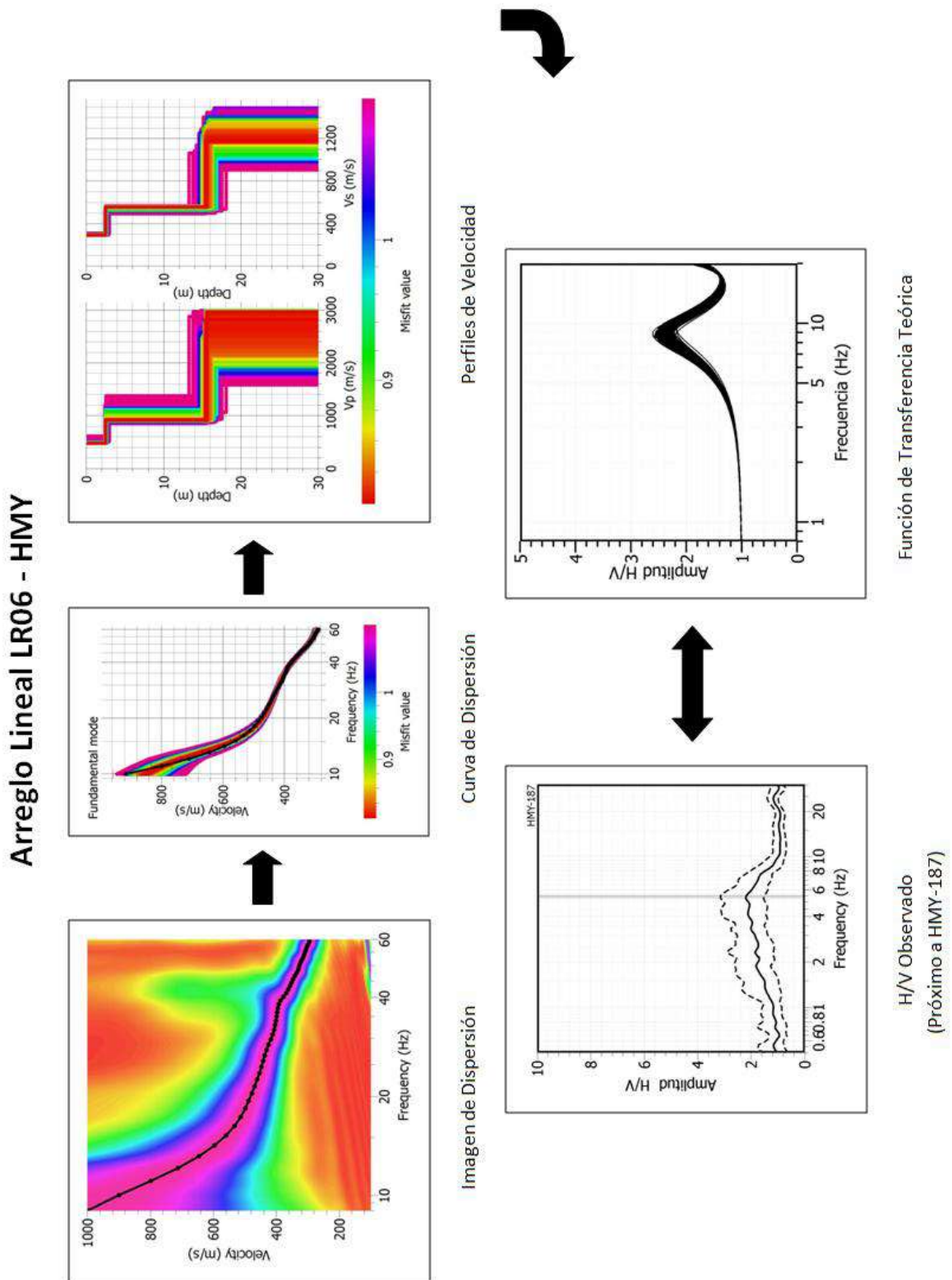


Figura 55.:f) Análisis e interpretación geofísica obtenido con el método MASW para el arreglo LR06 – HMY, extremo NO de la ciudad de Huarney (ver Figura 53)

En todos los casos, al realizar la inversión de los modelos de velocidad de ondas Vs para reconstruir sus frecuencias predominantes, se observa que 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.

Estos resultados han permitido identificar en el suelo la presencia de dos capas, en el río Huarmey y en la zona céntrica de la ciudad, la capa superficial corresponde a suelos muy blandos con velocidades bajas (entre 140 y 170 m/s) y espesores de 4 a 6 metros; y una segunda capa, cerca del río, con velocidades del orden de 170 m/s y en la zona céntrica, con velocidades entre 170 y 190 m/s, ambos con espesores que fluctúan entre los 14 y 20 metros, correspondiendo a suelos muy blandos a relativamente duros conforme uno se aleja del río. En el extremo norte de la ciudad, se identifica la presencia de dos capas, conforme se tiende más hacia el norte, la capa superficial aumenta en velocidad de 130 a 280 m/s con espesores alrededor de los 4 m, y una segunda capa presenta velocidades, para ambos casos, mayores a los 400 m/s con espesores que fluctúan alrededor de los 16 metros, correspondiendo a suelos duros.

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 Huarmey se han realizado 4 líneas de tomografía eléctrica con el dispositivo polo-dipolo y cuya distribución se muestra en la Figura 56. 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 13.5 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 57):

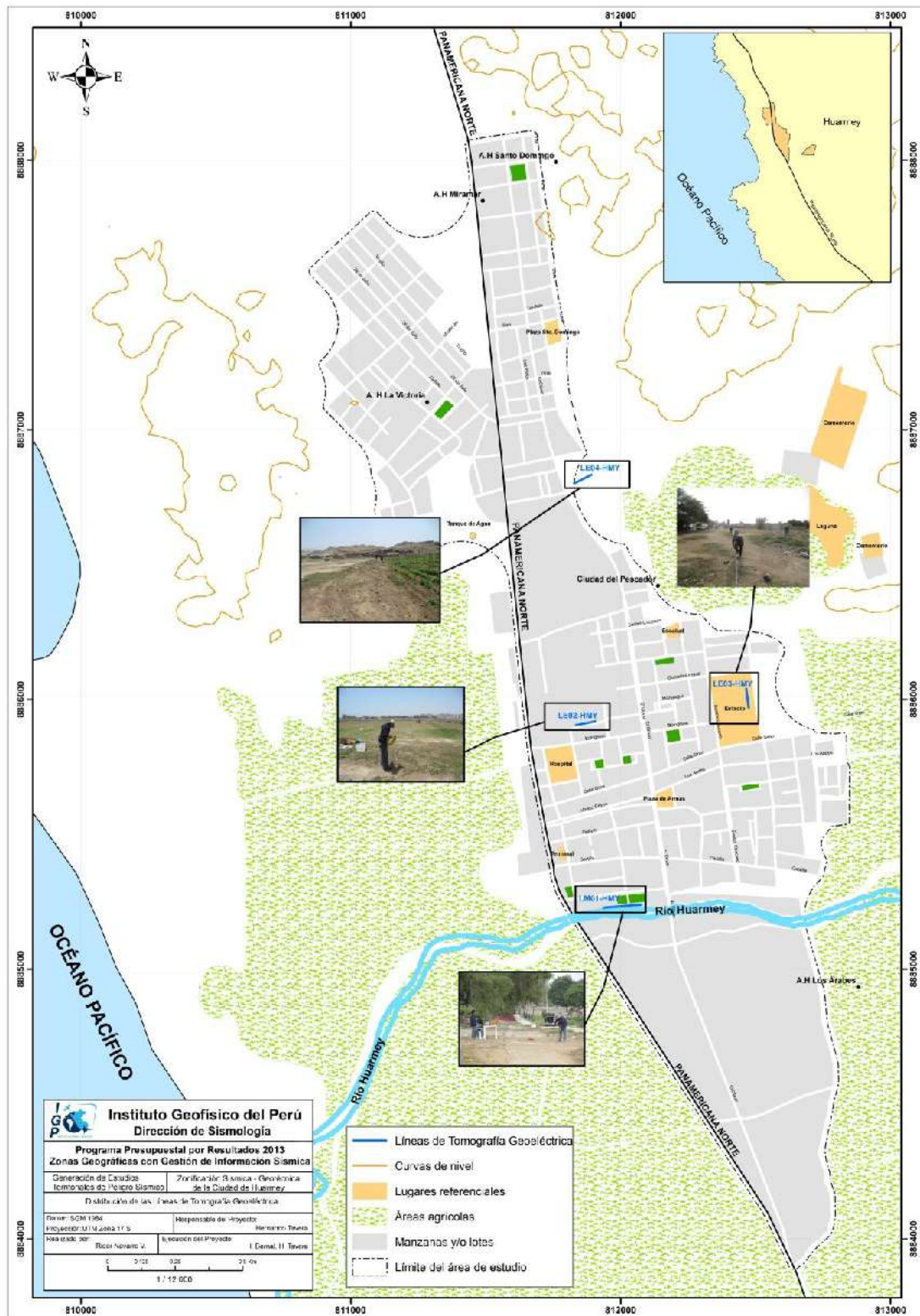


Figura 56: Mapa de la ciudad de Huarney y ubicación de las 4 líneas de tomografía eléctrica: LE01-HMY, LE02-HMY, LE03-HMY y LE04-HMY.

.- *Línea de Tomografía Eléctrica LE01-HMY*: Línea realizada próximo al río Huarney y su interpretación ha permitido identificar la presencia de suelos de muy Bajos Resistivos (3.44 ohm.m) a Moderadamente Resistivos (549.57 ohm.m), con el predominio de valores entre 20 y 100 ohm.m. En la sección se identifica la existencia de dos zonas con valores menores a 20 ohm.m, la primera de forma ovalada en el centro del perfil, entre 10 y 13 m de profundidad y la segunda, hacia el final de la línea, con valores de resistividad mayores a 100 ohm.m.

En superficie, los valores de resistividad se presentan como Bajo Resistivo, del inicio a más de la mitad de la línea; y Resistivo hacia el final de la misma. Los más resistivos se relacionarían con la presencia de arenas y los menos resistivos, a mayor presencia de limos, arcillas o agua debido a procesos de filtración derivados de los terrenos de cultivo. En profundidad, los valores se hacen menos resistivos, siendo estos de 20 ohm.m a 10 metros y estarían relacionados con posibles zonas saturadas debido a la proximidad del río o a la presencia de arcilla o limos de composición orgánica. A mayor profundidad, los valores aumentan a más de 100 ohm.m y podrían estar relacionados con la posible presencia de material impermeable.

.- *Línea de Tomografía Eléctrica LE02-HMY*: Línea realizada próximo al Hospital de Huarney y su interpretación permitió identificar la presencia de suelos de Bajos Resistivos (6.14 y 67.04 ohm.m.), con predominio de valores entre 20 y 50 ohm.m. En el perfil de tomografía se identifica la presencia de tres áreas con valores menores a 20 ohm.m, la primera de forma lenticular al inicio de la línea y a profundidades entre 5 y 10 m; la segunda en la parte media de la línea a una profundidad de 10 m; y la tercera, al final de la línea y a niveles de profundidad entre 5 y 10 m.

En superficie, los valores de resistividad se presentan como Bajo Resistivo en toda la línea. Las áreas menos resistivas se deben a la mayor presencia de limos, arcillas o agua provenientes de napas freáticas o flujos de agua de superficie que filtra a profundidad. A profundidades mayores a 5 metros, se presentan valores de Muy Bajos Resistivos de manera discontinua y podrían estar relacionados con el mayor grado de saturación debido a las variaciones de permeabilidad y porosidad de los materiales.

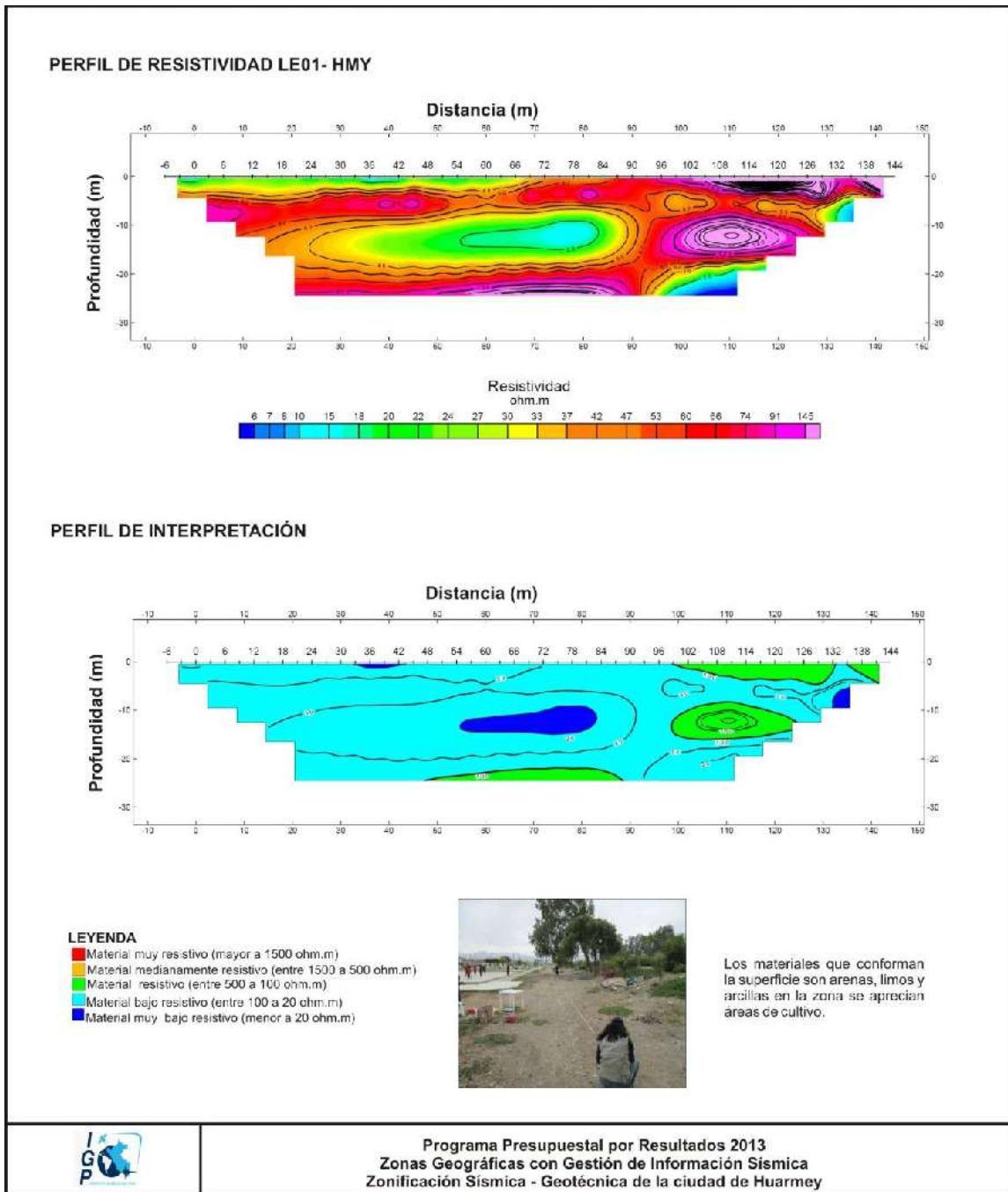


Figura 57: Línea de Tomografía Eléctrica LE01-HMY en las cercanías de río Huarney (ver Figura 41).

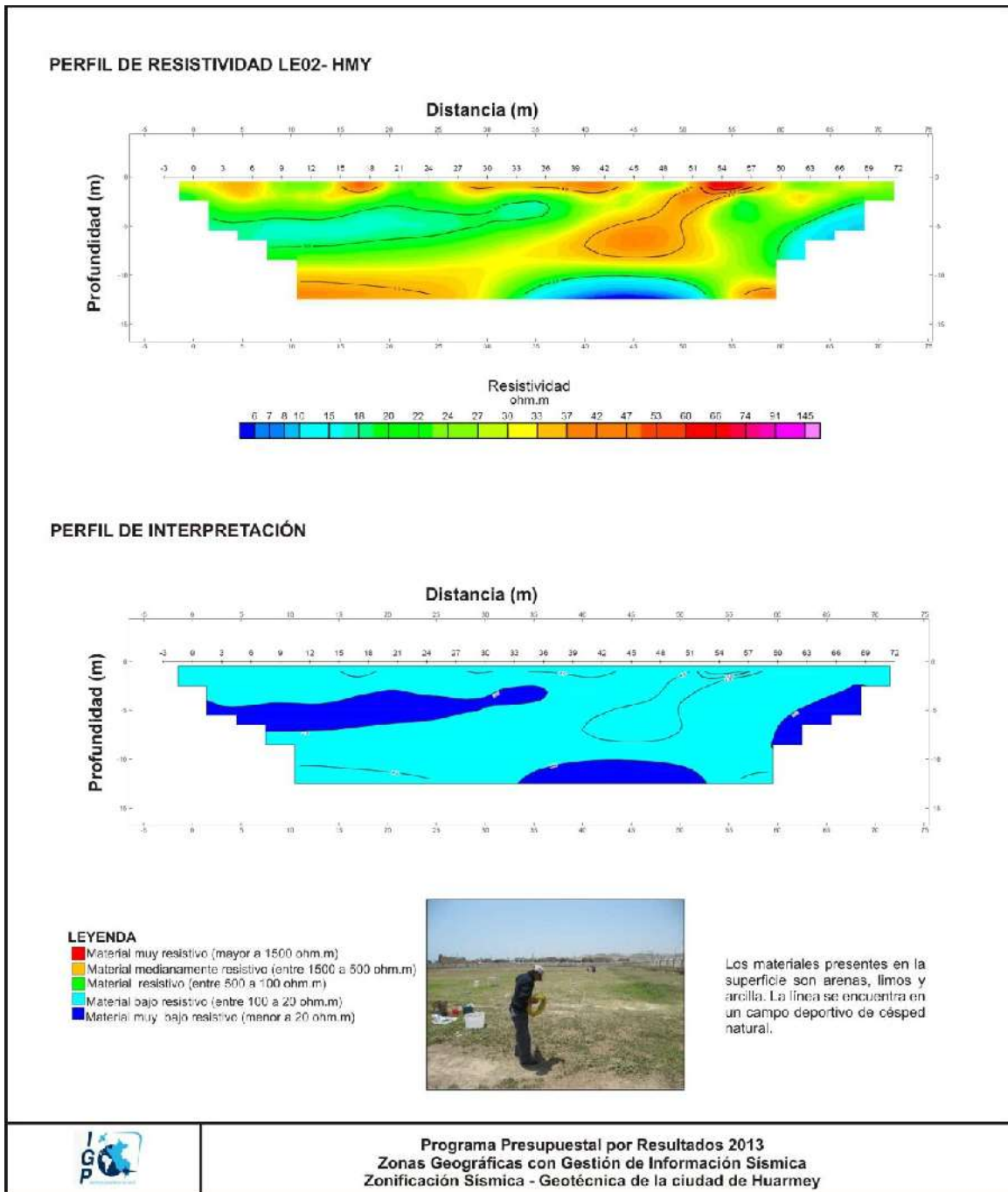


Figura 57: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE02-HMY en las cercanías del Hospital de Huarney (ver Figura 41)

.- *Línea de Tomografía Eléctrica LE03-HMY*: Línea realizada en el interior del estadio de Huarmey y su interpretación considera la existencia de suelos muy bajos de resistividad (entre 11.56 y 49.27 ohm.m.), con un predominio de valores entre 20 y 40 ohm.m. En la sección vertical se identifica la presencia de cuatro áreas de forma lenticular con valores de resistividad menores a 20 ohm.m. a profundidades entre 2 y 5 metros. Una de las áreas se extiende, en un buen tramo de la línea, a una profundidad mayor a 11 metros.

En superficie, los valores de resistividad se presentan como Bajo Resistivo y muy Bajo Resistivos, similar a las líneas anteriores. Las áreas menos resistivas se deberían a la mayor presencia de limos, arcillas, vegetación natural o agua proveniente de saturaciones a profundidad. Entre 2 y 5 metros de profundidad se presentan de manera discontinua valores de resistividad Muy Bajo Resistivo y podrían estar relacionados a zonas más saturadas o de acumulación de arcillas. A profundidades mayores a 11 metros se presentan valores de resistividad menores a 20 ohm.m, lo que indicaría la existencia de una zona de mayor saturación.

.- *Línea de Tomografía Eléctrica LE04-HMY*: Línea realizada en el extremo norte de la ciudad de Huarmey y su interpretación permitió identificar la presencia de suelos de baja resistividad (entre 1.57 y 41.84 ohm.m.), con predominio de valores menores a 20 ohm.m. En superficie y en profundidad, los valores de resistividad se presentan como de Muy Bajo Resistivo, en toda la línea, debido probablemente a la presencia de limos, arcillas, vegetación natural o agua proveniente de saturaciones a profundidad. En el extremo más profundo de la línea, hacia el final, se presenta una zona pequeña de resistividad ligeramente mayor, lo que sugiere el nivel de profundidad de alcance del agua filtrada proveniente del riego.

Estos resultados sugieren que los suelos de la ciudad de Huarmey presentan resistividades bajas a muy bajas, siendo la excepción los suelos presentes en las cercanías del río Huarmey con valores de hasta 500 ohm.m, debido probablemente a la mayor presencia de arenas. En general, las resistividades varían entre 20 y 50 ohm.m, aunque en algunas zonas puntuales se tiene resistividades bajas y a niveles entre 2 y 10 metros de profundidad, los cuales pueden deberse a posibles zonas saturadas de agua o de acumulación de arcillas. Los resultados obtenidos no permiten definir la presencia de capas con mayor o menor nivel freático en el subsuelo.

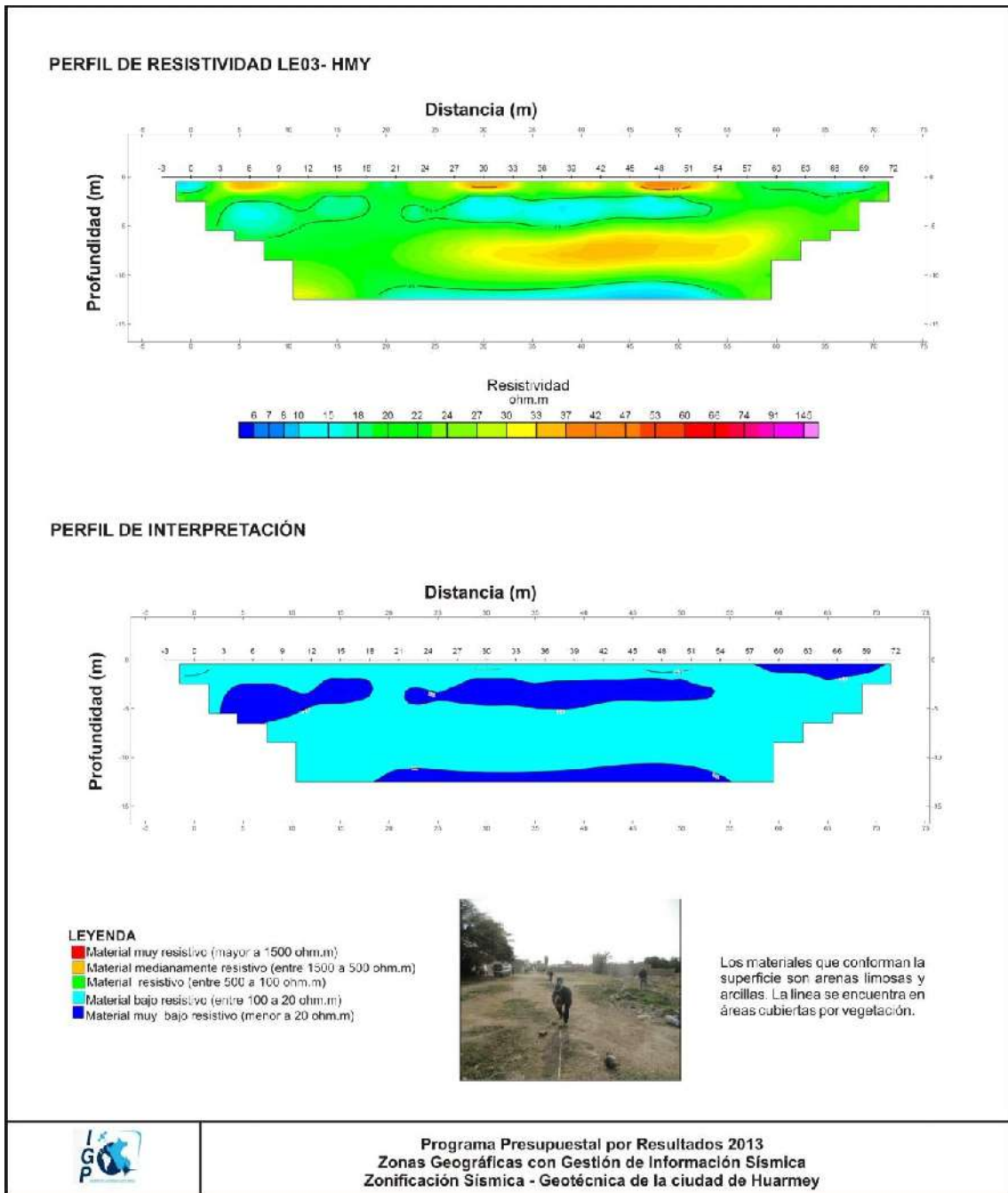


Figura 57: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE03-HMY en el Estadio de Huarney (ver Figura 41)

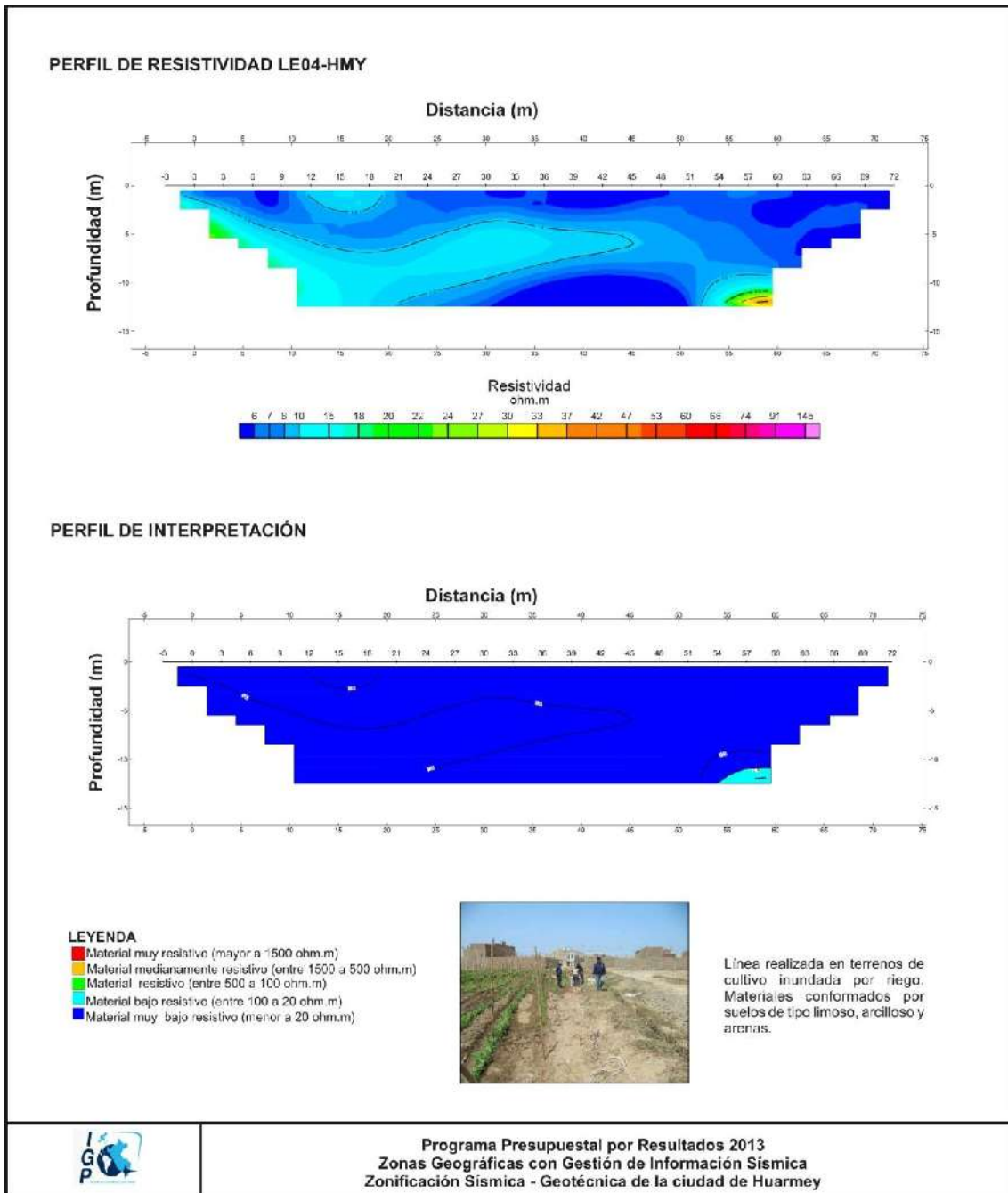


Figura 57: Continuación.../ Línea de Tomografía Eléctrica LE04-HMY en el extremo norte de la ciudad de Huarney (ver Figura 41)

12.- ZONIFICACIÓN SÍSMICA - GEOTÉCNICA

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Huarmey considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de cuatro tipos de suelos: Tipo S1, S2, S3 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales.

12.1.- Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica

Para la ciudad de Huarmey se propone la siguiente zonificación Sísmica – Geotécnica (Figura 58):

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 dominantes menores a 0.3 s, con velocidades de ondas de corte (V_s) del orden de 530m/s, correspondiendo a suelos Tipo S1 de la norma sismorresistente peruana. La zona presenta suelos con capacidad portante de 2 kg/cm².

ZONA II: Incluye las áreas conformados por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 8 y 18 m., subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial. Los periodos dominantes del terreno varían entre 0.3 y 0.5 s, velocidades de ondas de corte (V_{s30}) de 180m/s, correspondiendo a suelos Tipo S2 de la norma sismorresistente peruana. La zona presenta suelos con capacidad portante de 1 – 2 Kg/cm².

ZONA III: Conformada, en su mayor parte, por los depósitos de suelos finos y arenas de gran espesor que se encuentra en estado suelto. Los periodos dominantes del suelo varían entre 0.5 y 0.7 s, con velocidades de ondas de corte (V_{s30}) menores a 180m/s, por lo que su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S3 de la norma sismorresistente peruana. La zona presenta suelos con capacidad portante menores a 1 Kg/cm².

ZONA IV: Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Su comportamiento dinámico ha sido tipificado como suelo Tipo S4 de la norma sismorresistente peruana. Corresponde a suelos especiales y/o condiciones excepcionales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

CONCLUSIONES

Aspectos Geomorfológicos

La ciudad de Huarmey se encuentra sobre el abanico aluvial del río del mismo nombre, llegando a reconocer la existencia de seis unidades geomorfológicas: estribaciones de la Cordillera Occidental, penillanuras, lomas y colinas, conos de deyección, dunas y playas.

Aspectos Geológicos:

La ciudad de Huarmey se encuentra asentada sobre rocas volcánicas que conforman el substrato rocoso y litológicamente en la zona predominan lavas andesíticas del Miembro Los Morros (Formación La Zorra) y sobre ellas, se presentan depósitos aluviales, fluviales, marinos, eluviales y eólicos, lo cual permite considerar un escenario geológico bastante heterogéneo.

Aspectos Geodinámicos:

Las zonas adyacentes al cauce del río Huarmey han sido identificadas como susceptibles a peligros de inundación. La construcción de escenarios extremos (relacionados al fenómeno El Niño) considerando técnicas de modelamiento numérico, han permitido considerar que ante un posible desborde del río Huarmey, las zonas afectadas serían aquellas en donde se encuentran los A.H Los Árabes, Buenos Aires y la calle Paramonga, entre otras menores.

Aspectos Geotécnicos:

El análisis de suelos ha permitido identificar en la ciudad de Huarmey, la existencia de seis tipos de suelo: el sector norte de la ciudad constituido por arenas pobremente graduadas (SP) y con poco contenido de finos, los cuales se presentan como capas compactas constituidas por fragmentos de rocas

andesitas. En el extremo sur de la ciudad, los suelos están conformados por materiales finos, propios de arcillas y limos (CL, SM, SP-SM, SC-SM y CL-ML).

En dirección norte, con respecto al margen derecho del río Huarney, los suelos presentan baja capacidad portante; por lo tanto, requieren apoyo para mejorar las cimentaciones previas a la construcción de obras: A.H La Victoria, A.H Miramar, A.H Santo Domingo y zona centro de la ciudad. En el extremo sur de la ciudad, en las inmediaciones de los A.H Los Árabes y Buenos Aires, la capacidad portante es muy baja; razón por la cual, los suelos son considerados como susceptibles a presentar asentamientos diferenciales. Este mismo escenario se presentaría en la zona de la Urb. Nery debido a que el nivel freático se encuentra a una profundidad del orden de 2.10 m.

En la ciudad de Huarney, el nivel freático superficial se encuentra en su extremo sur a una profundidad promedio de 2.53 m. Hacia el extremo norte de la ciudad (A.H Miramar y La Victoria), no se ha encontrado nivel freático, por lo cual se deduce que este debe estar a mayor profundidad.

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 Huarney 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 Huarney en 18 minutos con altura de ola del orden de 7 metros, produciendo niveles de inundación horizontal hasta distancias de 1.2 km y vertical hasta de 5 metros. Este tsunami no afectaría a la ciudad de Huarney.

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 Huarmey es heterogéneo. Por ejemplo, en el extremo oeste del Tanque de Agua Potable de Huarmey, no se han identificado frecuencias predominantes y hacia el extremo NE de la ciudad las frecuencias que sobresalen presentan amplificaciones bajas, lo cual implica que son zonas con suelos más estables en comparación al resto de la ciudad. Del mismo modo, las frecuencias menores a 1.5 Hz se concentran próximos al río Huarmey con amplificaciones máximas relativas de hasta 9 veces, lo indica que estos suelos son altamente flexibles y por ende, inestables.

La distribución de periodos dominantes en la ciudad de Huarmey, sugiere la existencia de dos zonas cuyos suelos presentan características dinámicas diferentes. La primera zona con periodos dominantes mayores a 0.3 segundos, presente en la zona céntrica de la ciudad y en el área circundante al río Huarmey, lo cual sugiere la presencia de una capa relativamente uniforme y espesor del orden de 20 m que domina el comportamiento dinámico de la zona. La segunda zona, considera el extremo norte de la ciudad con periodos dominantes menores e iguales a 0.3 segundos, lo que sugiere la presencia de una capa superficial de poco espesor que es influenciada por una capa profunda y de mayor espesor que acondiciona efectos dinámicos especiales sobre la primera capa.

Los estudios con arreglos sísmicos lineales han permitido identificar en la ciudad de Huarmey, la presencia de suelos formados por dos capas. En zonas próximas al río Huarmey y zona céntrica de la ciudad, la capa superficial presenta suelos muy blandos con velocidades de ondas de corte (V_s) muy bajas (entre 140 y 170 m/s) y espesores de 4 a 6 metros, la segunda capa, con espesores de 14 a 20 metros y velocidades V_s entre 170 y 190 m/s, correspondiendo a suelos muy blandos a relativamente duros conforme uno se aleje del río Huarmey. Para el extremo norte de la ciudad, también se identificó suelos conformados por dos capas, con la particularidad que conforme se tiende más hacia el norte, la capa superficial presenta mayor velocidad V_s (de 130 a 280 m/s) con espesores del orden de 4 m, y una segunda capa, con velocidades

Vs mayores a los 400 m/s y espesores que fluctúan alrededor de los 16 metros, correspondiendo a suelos duros.

Los estudios de Tomografía Eléctrica muestran que los suelos en la ciudad de Huarmey presentan resistividades bajas a muy bajas. En general, se identifican valores de resistividad entre 20 y 50 ohm.m y en algunas áreas lenticulares, resistividades menores entre 2 y 10 metros de profundidad, las cuales pueden ser asociadas a la presencia de suelos saturados o con acumulación de arcillas. En estos suelos no fue posible diferenciar la existencia de capas representativas.

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 Huarmey, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de 4 zonas sísmicas - geotécnicas, las mismas que corresponden a suelos de Tipo S1, S2, S3 y S4. Esta clasificación permite proponer, en este estudio, el Mapa de Zonificación Sísmica – Geotécnica (Comportamiento Dinámico del suelo) de la ciudad de Huarmey.

RECOMENDACIONES

Este documento técnico debe ser utilizado por las autoridades locales de la ciudad de Huarmey 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 Huarmey.

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., Cisternas, A., Dorabath, C. (1990): Assessment in the size of large and great historical earthquake in Peru. B.S.S.A., 80,551-576
- Fäh D., Kind F. and Giardini D. (2002). Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects. *Journal of Seismology*, 7, 449-467
- 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 (1999): Cuadrángulo Geológicos de Huarmey y Huayllapampa. Boletín N°33 – hoja 21g. 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.030 (2003): Diseño sismorresistente en el Perú, SENCICO.
- Nuria, D. y A. González (1993): Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México. 6tas. Jornadas Chilenas de Sismología e ingeniería antisísmica. Santiago, Chile, 1, pp. 585-594.
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, México.
- Okada, H. (2003): The Microtremor Survey Method, Geophysical monograph series, No 12, Society of exploration geophysicists, 135 pp.
- 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