



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**



**CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y  
MITIGACIÓN DE DESASTRES**

**CONVENIO ESPECÍFICO DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL ENTRE EL  
MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO Y LA UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE INGENIERÍA “ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y  
VULNERABILIDAD EN LA CIUDAD DE LIMA”**



**INFORME**

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL DISTRITO DE  
CHORRILLOS**

**LIMA – Setiembre, 2010**

## ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	ANTECEDENTES .....	2
1.2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	3
1.3	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	3
II.	EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	4
2.1	SISMICIDAD DEL DISTRITO DE CHORRILLOS.....	4
2.2	EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO .....	6
III.	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	7
3.1	GEOLOGÍA REGIONAL DE CHORRILLOS.....	7
3.2	GEOLOGÍA REGIONAL DE CHORRILLOS.....	8
IV.	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SUBSUELO DEL DISTRITO DE LA CHORRILLOS .....	11
4.1	PERFIL ESTRATIGRÁFICO. ....	11
4.2	MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA. ....	14
V.	CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUBSUELO DE CHORRILLOS.....	19
5.1	INTRODUCCIÓN.....	19
5.2	ENSAYOS DE MEDICIÓN DE ONDAS DE CORTE – MÉTODO MASW.....	20
5.2.1	FUNDAMENTO TEÓRICO .....	20
5.2.2	TRABAJOS DE CAMPO .....	21
5.2.3	PERFILES SÍSMICOS.....	22
5.3	MEDICIÓN DE MICROTREPIDACIONES.....	36
5.3.1	MARCO TEÓRICO .....	37
5.3.2	TRABAJOS DE CAMPO .....	38
5.3.3	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	39
VI.	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	40
VII.	REFERENCIAS .....	45

## RESUMEN

La Universidad Nacional de Ingeniería y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, firmaron un convenio específico para ejecutar el estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la ciudad de Lima.

En cumplimiento del convenio, el objetivo principal del presente estudio es elaborar un mapa de microzonificación sísmica para el distrito de Chorrillos, complementando trabajos anteriormente desarrollados en este distrito con fines similares.

Esta investigación se llevo a cabo desarrollando tres áreas de estudio; peligro sísmico que emplea métodos probabilísticos y determinísticos para estimar la aceleración máxima horizontal en roca (PGA), valor importante para estimar las aceleraciones del terreno; la mecánica de suelos que caracterizando el suelo mediante exploración de campo, determina el tipo de material sobre el cual se asienta el área urbana y la dinámica de suelos que permite mediante ensayos de tipo geofísicos caracterizar el comportamiento dinámico de los suelos.

El Peligro Sísmico es un trabajo netamente de gabinete, desarrollándose en función de leyes de atenuación existentes y programas de cómputo diseñados para tal fin. Los estudios de mecánica y dinámica de suelos pasan primero por una etapa de recopilación de información existente, evaluando su cantidad y calidad, y programando luego los ensayos de campo en número suficiente para alcanzar los objetivos planteados.

Se presenta en los Apéndices A, B y C los resultados obtenidos en estas tres áreas de estudio, utilizando tanto la información recopilada como la generada en este trabajo.

Se obtiene un mapa de microzonificación sísmica producto de la superposición de resultados obtenidos en las diferentes áreas de estudio, cuatro son las zonas que se identifican para el área urbana de este distrito. Las áreas señaladas en el mapa, reflejan el posible comportamiento sísmico, de manera cuantitativa y de menos a más desfavorable, del suelo del distrito ante la ocurrencia de un sismo severo. Este mapa permite proyectar los posibles daños que pueden ocurrir a las edificaciones y a la población. Se convierte también en un gran instrumento para la planificación urbana y/o para la reconstrucción post-desastre sísmico.

# MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL DISTRITO DE CHORRILLOS.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

El distrito de Chorrillos se ubica en el sur de la ciudad de Lima, la primera denominación oficial de Chorrillos fue la de "**San Pedro de los Chorrillos**" en alusión a los chorrillos de agua que se desprendían de los barrancos hacia el lado de la playa Agua Dulce, y por ser un pueblo de pescadores cuyo Santo Patrón es **San Pedro**.

La Fundación de Chorrillos como pueblo data de 1688, remontándose su origen a la época preincaica.

Alrededor del año 1,000 después de Cristo, se establecieron en las faldas del Morro Solar grupos humanos pertenecientes a la cultura Ichma, los cuales formaron el curacazgo de Sulco o Armatambo. Ellos constituyeron un importante centro Urbano denominado Ichimatampu, nombre que poco a poco fue derivando al de Armatambo. Los hallazgos arqueológicos demuestran que estos habitantes desarrollaron aptitudes para la pesca y la obtención de recursos marinos.

El Pueblo Hispano de Chorrillos se fundó y comenzó a poblarse gracias a la donación de tierras que hiciera el Alférez Real Francisco Carrasco, a un grupo de pescadores que vinieron desde Huacho y la Villa de Surco y que fueron los primeros pobladores que construyeron sus habitaciones con características rústicas en este lugar.

Durante la Colonia, Chorrillos constituyó una serie de haciendas y zonas de descanso para las familias españolas. También contribuyeron a la fama y prestigio de Chorrillos de esa época inmigrantes italianos, ingleses y franceses que se afirmaron por esta zona del Valle de Lima.

Durante la guerra del Pacífico, Chorrillos fue saqueado y destruido en un 70% de sus edificaciones, la peor parte de la destrucción fue el Malecón, su suntuosidad quedó reducida a escombros por el incendio de Enero de 1881. Su reconstrucción fue muy lenta y además tuvieron que soportar las consecuencias del terremoto de Mayo de 1940.

Hoy en día, Chorrillos es un distrito heterogéneo, el norte del distrito se encuentra habitado mayormente por una clase media, donde se encuentran los restos de su pasado como balneario; al este, una zona de nuevas urbanizaciones y de asentamientos precarios; y al sur, la zona de Villa, que alberga Los Pantanos de Villa, la única Reserva Ecológica de la ciudad y varias urbanizaciones de clase media como Los Cedros, Las Brisas y la zona residencial de La Encantada de Villa.

Este distrito ha sufrido severos daños en sus edificaciones en los diversos sismos que han afectado a la ciudad de Lima, las intensidades sísmicas determinadas para este distrito han sido mayores en comparación con otros distritos de Lima, esto debido a las características de sitio que se encuentran en el distrito y que influyen en su respuesta sísmica.

## **1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

La Universidad Nacional de Ingeniería y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, firmaron un convenio específico para ejecutar el estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad para la ciudad de Lima.

En cumplimiento del convenio, el objetivo principal del presente estudio es elaborar un mapa de microzonificación sísmica para el distrito de Chorrillos, complementando trabajos anteriormente desarrollados de este distrito con fines similares.

## **1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

El distrito de Chorrillos se encuentra ubicado en el Departamento de Lima, Provincia de Lima, en la Costa Peruana a orillas del Mar (Océano Pacífico), a una distancia aproximada de 20 km. del centro de la Ciudad de Lima.

El distrito de Chorrillos está limitado por:

- el norte, con el distrito de Barranco.
- el noreste, con el distrito de Santiago de Surco.
- el este, con el distrito de San Juan de Miraflores.
- el sur este, con el distrito de Villa el Salvador.

- el Oeste, con el Océano Pacífico.

La extensión geográfica queda definida, aproximadamente por las siguientes coordenadas geográficas:

77° 03´ a 76° 97´ Longitud Oeste.

12° 15´ a 12° 23´ Latitud Sur.

La superficie del distrito de Chorrillos tiene una extensión territorial aproximadamente de 44 Km<sup>2</sup>, con una cota promedio de 43 metros sobre nivel del mar.

El Plano P-01 presenta el plano base del distrito de Chorrillos, mostrando la zona urbana que abarca el área de estudio.

## II. EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación se desarrolla la sismicidad del área de estudio y la evaluación de su peligro sísmico. Mayores detalles se encuentran en el Apéndice A.

### 2.1 SISMICIDAD DEL DISTRITO DE CHORRILLOS

El distrito de Chorrillos, y la ciudad de Lima en general, está expuesto a un alto nivel de peligro sísmico, producto de la alta actividad sísmica que genera la subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana, cuyos bordes convergen a pocos kilómetros del litoral peruano-chileno.

Dentro de los sismos históricos ocurridos en la Zona Central del Perú y que de alguna forma han afectado a la ciudad de Lima, tenemos los siguientes:

- El sismo del 9 de Julio de 1586, con intensidades de IX MMI en Lima y VI MMI en Ica.
- El sismo del 13 de Noviembre de 1655, con intensidades de IX MMI en el Callao y VIII MMI en Lima.
- El sismo del 12 de Mayo de 1664, con intensidades de X MMI en Ica, VIII MMI en Pisco y IV MMI en Lima.
- El sismo del 20 de Octubre de 1687, con intensidades de IX MMI en Cañete, VIII MMI en Ica y VII MMI en Lima.

- El sismo del 10 de Febrero de 1716, con intensidades de IX MMI en Pisco y V MMI en Lima.
- Sismo del 28 de Octubre de 1746 a las 22:30 horas: Destrucción de casi la totalidad de casas y edificios en Lima y Callao. Intensidad de X (MMI) en Chancay y Huaral, IX –X (MMI) en Lima, Barranca y Pativilca.
- El sismo del 30 de Marzo de 1828, con intensidad de VII MMI en Lima.
- El sismo del 04 de Marzo de 1904, con intensidad de VII - VIII MMI en Lima.
- Sismo del 24 de Mayo de 1940 a las 11:35 horas: Intensidad de VIII (MMI) en Lima, VI (MMI) en el Callejón de Huaylas, V (MMI) en Trujillo.
- El sismo del 17 de Octubre de 1966, con intensidad VII MMI en Lima.
- El sismo del 03 de Octubre de 1974, con intensidad de VIII MMI en Lima y VII MMI en Cañete.
- El sismo del 18 de Abril de 1993, con intensidad de VI MMI en Lima y V MMI en Cañete y Chimbote.
- El 15 de Agosto del 2007 ocurrió un sismo con origen en la zona de convergencia de las placas, el cual fue denominado como “el sismo de Pisco” debido a que su epicentro fue ubicado a 60 km al Oeste de la ciudad de Pisco. Este sismo tuvo una magnitud de momento sísmico  $M_w=7.9$  de acuerdo al Instituto Geofísico del Perú y de 8.0 según el Nacional Earthquake Center (NEIC). El sismo produjo daños importantes en un gran número de viviendas de la ciudad de Pisco (aproximadamente el 80%) y menor en las localidades aledañas, llegándose a evaluar una intensidad del orden de VII en la escala de Mercalli Modificada (MM) en las localidades de Pisco, Chincha y Cañete, V y VI en la ciudad de Lima. VI en las localidades de Yauyos (Lima), Huaytará (Huancavelica), IV en las ciudades de Huaraz y localidades de Canta, Puquio, Chala. Este sismo produjo un tsunami que se originó frente a las localidades ubicadas al sur de la península de Paracas, y una licuación generalizada en un área de más de 3Km de longitud por 1.0 Km de ancho en las zonas de Canchamaná y Tambo de Mora en Chincha.

Del análisis de la información existente se deduce que para el área de

influencia considerada en este estudio existe poca información histórica. Desde el siglo XVI hasta el siglo XIX solo se reportan los sismos sentidos en las ciudades principales, lo cual implica que dicha actividad sísmica no es totalmente representativa, ya que pudieron haber ocurrido sismos importantes en lugares remotos y que no fueron reportados. En los terremotos de 1940 y 1974 que afectó a Lima se atribuye una intensidad de VIII-IX para la zona del antiguo Malecón del distrito de Chorrillos. Se concluye que de acuerdo a la historia sísmica del área de Lima (400 años), han ocurrido sismos de intensidades tan altas como IX en la escala de Mercalli Modificada.

## 2.2 EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico del área de estudio se ha determinado utilizando la información pertinente en la literatura técnica como son las leyes de atenuación de Youngs et al (1997) para suelo y roca, la ley de atenuación del CISMID (2006) y la ley de atenuación de Sadigh et al (1997) y como herramienta para el proceso de información el programa de cómputo CRISIS 2007, desarrollado por Ordaz et al. (1999), que emplea métodos numéricos conocidos. Se han utilizado las fuentes sismogénicas para sismos continentales y de subducción, las cuales están basadas en el trabajo de tesis de investigación de Gamarra y Aguilar (2009).

Para la evaluación del peligro sísmico mediante leyes de atenuación para aceleraciones espectrales en el distrito de Chorrillos, se ha considerado las coordenadas geográficas:

$$77.01^{\circ} \ 12.19^{\circ}$$

A continuación se utilizará la clasificación de suelos propuesta en el Internacional Building Code (IBC, 2006) para la descripción de los resultados obtenidos, los cuales muestran que la aceleración horizontal máxima del sismo de diseño considerando un suelo del Tipo B (roca), es de 0.34 g, este valor está referido al basamento rocoso o suelo firme y la aceleración horizontal máxima del sismo de diseño considerando un suelo firme del Tipo D, y considerando un suelo denso del Tipo C, presenta aceleraciones horizontales máximas (PGA) que varían entre 0.47 g a 0.55 g. Estos valores de aceleración corresponden a un periodo de retorno de 475 años, con un periodo de exposición sísmica



de 50 años con una probabilidad de excedencia del 10%.

### III. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las características geológicas y geomorfológicas del distrito de Chorrillos, se han obtenido de la información contenida en la tesis de Microzonificación Sísmica de los Distritos de Chorrillos y Barranco, desarrollado por Carmen Ayquipa (1995) y del Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 distritos de Lima y Callao (CISMID, 2004).

En el plano P-02 del Anexo 1, se muestra el Plano Geológico del distrito de Chorrillos, desarrollado por el Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 distritos de Lima y Callao (CISMID, 2004).

#### 3.1 GEOLOGÍA REGIONAL DE CHORRILLOS.

A nivel Regional la zona de estudio se encuentra dentro de los límites de influencia del cono de deyección cuaternario del río Rimac. Enmarcados en rocas sedimentarias del jurásico inferior al cretáceo inferior y rocas intrusivas del batolito andino (cretáceo superior – terciario inferior).

El abanico de deyección original del río Rimac, se desarrollaba según la línea Vitarte- Quebrada de Armendáriz, a lo largo de lo que hoy se conoce como río Surco, pasando por una apertura en los cerros Agustino y Monterrico con una generatriz de 17 km de largo y una cuerda actual de 10 km (Morro Solar- Magdalena) (CISMID. 2004).

El cono de deyección del río Rimac consiste de material aluvial, con presencia de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. Estos sedimentos han sido depositados en la era del pleistoceno, sobre el zócalo rocoso más antiguo, compuesto por rocas sedimentarias del mesozoico (Ayquipa, 1995).

EL área de estudio se encuentra atravesada por diversas fallas de magnitud regional, la más importante es la que se conoce como falla de La Chira aproximadamente (N-NO), otras fallas de menor importancia son las de Conchan y Villa. En relación con la actividad actual de las fallas descritas, solamente la falla de La Chira – San Martín de Porres o “Falla de Lima”, muestra indicios de alguna consideración, sin embargo

no se tiene evidencias críticas de actividad sísmica en tiempos históricos (CISMID, 2004).

### **3.2 GEOLOGÍA LOCAL DE CHORRILLOS**

En el área del Distrito de Chorrillos, aflora una secuencia sedimentaria que abarca desde el cretáceo inferior al cuaternario reciente. Durante el cretáceo inferior en el distrito de Chorrillos tuvieron lugar la unidad estratigráfica del Morro Solar. Y durante la era del cuaternario reciente tuvo lugar los sedimentos no consolidados. La geología del Morro Solar está conformada principalmente por tres formaciones, Marcavilca, La Herradura y el Salto del Fraile. Los sedimentos no consolidados están representados por depósito detríticos cuaternarios, los cuales comprenden los materiales detríticos aluviales, de playa y eólicos.

#### **A. Era del Cretáceo:**

En el macizo del Morro Solar se pueden reconocer tres unidades estratigráficas, bien definidas que pertenecen al cretácico inferior. El espesor de los sedimentos es aproximadamente de unos 450m.

Las principales formaciones de los estratos que afloran en el morro solar son: Marcavilca, La Herradura y el Salto del Fraile.

#### **Formación Salto del Fraile.**

Esta formación está compuesta por una serie de estratos de cuarcita, constituyendo la parte inferior de la estratigrafía que aflora en el área del Morro Solar, su espesor total no se conoce por no aflorar su base, la potencia visible de las cuarcitas es aproximadamente 70 m; en el techo suprayacen lutitas de la formación La Herradura. La formación Salto del Fraile aflora solamente en las faldas del cerro virgen, en el extremo Nor - Oeste (NW) del Morro Solar, esto se puede observar en los cortes de las pistas que va de chorrillos al balneario de La Herradura.

La cuarcita de esta formación es una roca compacta y dura, de color blanco grisáceo o gris parduzco, de grano fino, se rompe irregularmente.

#### **Formación La Herradura.**

Esta formación aflora en la parte central del macizo, se puede subdividir en dos miembros, La Virgen y La Herradura.

La Virgen se compone de lutitas de color negro, de estratificación muy fina, contiene nódulos calcáreos achatados. El espesor varía entre 15 y 25m: Al intemperizarse las lutitas dan origen a un suelo polvoriento y oscuro que hace un marcado contraste con el suelo arenoso y claro producido por la desintegración de la cuarcita de la formación Salto del Fraile. Estas lutitas afloran en la parte Nor – Oeste del Morro Solar, conocido como cerro soldado desconocido; hacia arriba, ellas pasan gradualmente a areniscas finamente estratificadas, de grano muy pequeño que constituyen los estratos inferiores de la formación La Herradura suprayacente, se trata pues de un contacto gradacional que parcialmente está cubierto; su ubicación es bastante incierta.

El miembro La Herradura, está constituida por tres unidades litológicas: areniscas, lutitas y calizas. La parte inferior de este miembro está conformada por areniscas blancas y grises estratificadas. La parte media se compone de lutitas negras, finamente estratificadas, con un color de gris a negro. Estas lutitas se pueden apreciar en al sur de la playa La Herradura, donde tiene un espesor de 30 m aproximadamente, también se pueden observar en las inmediaciones de las ruinas de Armatambo. La parte superior se compone de calizas negras compactas, su intemperización da lugar a la formación de un material pizarroso, su espesor es de 5 m en La Herradura y 15 m en Armatambo. Los estratos de calizas son fácilmente reconocibles en toda el área del morro.

### **Formación Marcavilca.**

La formación Marcavilca esta principalmente constituida por areniscas. La subdivisión litológica se basa en sus colores y su estratificación, tenemos tres miembros: Morro Solar, Marcavilca y La Chira.

El miembro Morro Solar es la parte inferior de la formación Marcavilca, está constituido generalmente por areniscas abigarradas, negras, brunas, violetas y rojas, estratificadas finamente, se presentan delgados lechos de lutitas. Las areniscas están compuestas por granos muy pequeños y sub angulares de cuarzo, envueltos en un cemento limonítico.

El miembro Marcavilca se compone de areniscas de color blanco a beige claro y de grano fino, con estratificación muy delgada en la parte inferior y más gruesa en la superior, su potencia total se estima de 150

a 170 m. En su base es decir inmediatamente encima de las pizarras grises del tope del miembro del Morro Solar, se encuentra un estrato delgado de areniscas con estratificación fina, sobre el cual yace otro de arenisca bruna de 5m de potencia, el cual es fácilmente identificable.

El miembro La Chira se compone de areniscas de color chocolate claro, de grano fino, contiene gran cantidad de óxido de hierro, que da lugar a que la roca se intemperice fácilmente, formando superficies suaves, pudiendo apreciarse un marcado contraste entre los dos miembros Marcavilca y La Chira. Los estratos del miembro La Chira afloran en la parte más alta del cerro Manchado y en los Cerros Conchán.

## **B. Cuaternario.**

En el distrito de Chorrillos afloran sedimentos no consolidados de edad cuaternaria, estos sedimentos por su origen se han dividido en tres partes:

- Depósitos de origen Eólicos.
- Depósitos de origen Aluvial
- Depósitos de playa.

Al sur del cerro Marcavilca y en los alrededores de los cerros Conchán, se encuentran grandes extensiones cubiertas por arenas de origen eólico que se han acumulado debido a la acción obstaculizante del ramal sur, formados por los cerros Marcavilca y Manchado. La arena eólica es de grano fino, proviene de las extensas playas de Conchán, sus acumulaciones constituyen capas uniformes de espesor desconocido.

También las arenas transportadas por el viento en la dirección SE y SSE, se depositaron en las faldas del macizo central, constituyendo un grueso manto de arena fina que ha rellenado las laderas y producido suaves pendientes, en cambio en la ladera norte del ramal sur, existe un delgado manto de arena eólica. El macizo central y el ramal norte ostenta sólo un suelo de poco espesor que permite reconocer fácilmente las características geológicas en contraste con el ramal sur, donde la arena oculta los rasgos geológicos.

En la parte Norte y Noroeste de Chorrillos se observa materiales de origen aluvial, muy poco diagenizados, que forman parte del abanico aluvial del río Rimac. En los acantilados de la playa se observa que

dicho material, se compone de conglomerados con cantos rodados de tamaño variable, siendo su matriz de arena arcillosa. Los cantos rodados consisten en su mayoría de rocas volcánicas. Los depósitos fluviales se han constituido durante la última etapa de la desglaciación pleistocénica, cuando el entonces caudaloso río Rimac transporto una carga de material bastante abundante, depositándola en forma de abanico aluvial.

En la parte Sur – Oeste de Chorrillos se observa los depósitos de playa (depósitos marinos), se trata de depósitos de arenas recientes, originados por acción agradacional de las olas y las corrientes marinas. (Ayquipa, 1995).

#### **IV. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL SUBSUELO DEL DISTRITO DE LA CHORRILLOS**

##### **4.1 PERFIL ESTRATIGRÁFICO.**

La determinación de las características geotécnicas del Distrito de Chorrillos, se ha realizado tomando como base los estudios de mecánica de suelos elaborados para el Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 Distritos de Lima y Callao (CISMID, 2004), así como de la recopilación de un gran número de estudios de mecánica de suelos para proyectos de ingeniería ejecutados en este distrito y el registro de pozos de agua realizados por SEDAPAL. Esta información ha sido complementada con un programa de exploración geotécnica de verificación, consistente en la excavación de calicatas y extracción de muestras de suelos para su respectivo análisis en el laboratorio, Ensayos de Penetración Estándar (SPT), Ensayos de Cono Peck y Ensayos de Penetración Ligera (DPL). La ubicación de todos los estudios recopilados, calicatas ejecutadas, ensayos SPT y pozos de Sedapal se muestran en el Plano P-01 del Apéndice B. Los registros de calicatas y ensayos SPT ejecutados en este estudio se ubican en el Anexo B-1 del Apéndice B, la información recopilada se presenta en los Anexos B-0 y B-2, respectivamente del Apéndice B.

Seguidamente se presenta una descripción de la estratigrafía de los suelos recopilados y ejecutados de acuerdo a los siguientes sectores:

**Playa**, comprende la zona adyacente al mar, en la parte sur de Chorrillos, y agrupa a los terrenos del Club Cultural Deportivo Lima, sector oeste de Los Cedros de Villa, parte de las Urbanizaciones La Encantada y Las Brisas de Villa. De la información recopilada analizada y la ejecutada (S-02) en este sector; en Los Cedros de Villa se ha encontrado relleno de 1.00 m de espesor conformado por roca triturada tipo lutita. En las urbanizaciones La Encantada de Villa y en las Brisas, los rellenos llegan hasta los 0.5 m y están conformados por limos arcillosos, de plasticidad baja; y restos de ladrillos con presencia de raíces secas, respectivamente. Seguido a estos rellenos se ha identificado arenas limosas mal graduadas (SP-SM), seguida por arenas limosas (SM) y arenas mal gradadas (SP) no plásticas, con presencia de restos de conchuelas, en estado saturadas, la compacidad varía de suelta superficialmente a muy densa por debajo de 2m de profundidad. El nivel freático, se encuentra por debajo de los 3m de profundidad.

Se realizó un ensayo de Penetración Estándar S-02, llegando a 4.2 m de profundidad en donde se encontró arena mal gradada, muy densa saturada y con presencia de conchuelas, a partir del cual se continuó con el ensayo de penetración Cono Peck hasta una profundidad de 4.75 m. El nivel freático se encontró a 0.90 m.

**Huertos de Villa**, comprende la Urb. Los Huertos de Villa y parte oeste de la Urb. La Encantada de Villa, el suelo en este sector, se caracteriza por la presencia de limos arenosos de plasticidad media, medianamente compactos seguido por estratos de arenas limosas y arenas mal gradadas, medianamente densas y en estado saturado. En el área norte, adyacente a los pantanos se encuentran estratos de arcillas limosas de baja plasticidad (CL), a continuación le siguen arcillas OH y arcillas limosas CH de alta plasticidad, de consistencia blanda y saturada.

En la Urb. La Encantada de Villa, se realizó un ensayo de Penetración Estándar S-03, llegando a 4.25 m de profundidad en donde se encontró arenas mal gradadas de compacidad muy densa, a partir de esta profundidad se continuó con el ensayo de penetración Cono Peck hasta los 5.45 m. El nivel freático se encontró a 1.35 m.

En la Urb. Los Huertos de Villa, se realizó un ensayo de Penetración Estándar S-04, llegando a 3m de profundidad en donde se encontró la grava, se continuó con el ensayo de penetración Cono Peck hasta una profundidad de 3.60 m. El nivel freático se encontró a 0.90 m.

**La Campiña**, comprende la zona norte de Chorrillos hasta el manto rocoso donde se forma el Cuello de Villa, y la conforman entre otras las Urbanizaciones de Chorrillos, Nuevo Chorrillos, Huacrachuco, San Juan, San Tadeo, Rosario de Villa, Santa Leonor, Los Laureles, La Campiña, los pueblos jóvenes Intillacta, Marcavilca, Cerro Cruz de Armatambo y terrenos de la Escuela Técnica del Ejército. Esta zona está conformada por arenas (SP, SM, SP-SM) y limos de baja plasticidad (ML), intercaladas con estratos de arcillas de mediana plasticidad (CL) y arcillas de alta plasticidad (CH), de diferentes espesores.

En la Zona del Cuello de Villa, se ha identificado arenas superficiales, y a profundidades mayores a 2.0 m se encuentran estratos de grava con matriz arenosa y/o arcillosa. De acuerdo a la geología este material gravoso no es uniforme dado a que es una zona de contacto, como se aprecia en los perfiles estratigráficos de los pozos recopilados.

De acuerdo a la calicata C-05, se verifica superficialmente estratos de arenas limosas de compactidad firme en estado húmedo con presencia de grava sub-redondeada hasta profundidades de 1.5 m, seguido por gravas con cantos rodados de tamaño máximo de 8”.

**Pantanos y otros**, esta zona lo conforman Los Pantanos de Villa y terrenos colindantes incluyendo parte de los terrenos del Country Club de Villa.

Los suelos identificados en los pantanos son turbas y materiales orgánicos de alta plasticidad.

De los estudios recopilados en el Club Las Garzas Reales y en zonas cercanas a la Av. Huaylas, así como de la calicata C-2 ejecutada, se ha encontrado que la estratigrafía del suelo está conformada por rellenos artificiales compuesto por grava arenosa, en estado saturado, compactidad suelta, con espesores variables de 0.40 a 1 m, seguido por estratos de arena mal gradada (SP), con intercalaciones de estratos de

arenas limosas (SP-SM) saturadas, medianamente densas a densas a profundidades mayores a 3 m.

El nivel freático se presenta en algunos casos como espejo de agua (pantanos) y en otros a nivel de la superficie del terreno.

#### **4.2 MICROZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA.**

Los perfiles de suelos elaborados para las diferentes zonas del área de estudio fueron implementados en una base de datos de un sistema de información geográfica (GIS), ya que esta herramienta permite combinar un gran volumen de datos de diferente tipo, incluyendo un adecuado manejo de las bases de datos y una rápida y detallada presentación gráfica de resultados mediante mapas temáticos, y así visualizar con mayor claridad la variabilidad espacial de los diferentes tipos de suelos en el área en estudio; siendo posible elaborar mapas de suelos para profundidades de 1 m y 2 m; como se muestran en los Planos P-02 y P-03 respectivamente (Apéndice B) y el Mapa de Distribución de Suelos P-04, para mayores potencias (Apéndice B).

Esta información ha permitido delimitar con mayor precisión las cuatro zonas geotécnicas identificadas en el distrito de Chorrillos. La delimitación del área de estudio por tipos de suelos es una información básica para realizar el modelamiento del comportamiento del terreno en la determinación del nivel de peligro sísmico, y que complementando con la información dinámica del terreno se definirá, el mapa de microzonificación sísmica de Chorrillos.

En el Plano P-02 (Apéndice B), se muestra un mapa de tipos de suelos al nivel de 1 m de profundidad, el cual es el nivel promedio de la profundidad de cimentación para las edificaciones convencionales. En este plano se puede observar que gran parte de la zona se encuentra cimentada sobre estratos de suelos arcillosos limosos o arenas limosas de compacidad suelta, predominando un suelo arenoso, lo cual se corrobora con los diseños de cimentaciones especiales como zapatas conectadas o plateas de cimentación consideradas en los estudios de mecánica de suelos recopilados para diferentes proyectos de ingeniería.



Con los antecedentes descritos, así como de la necesidad de definir las características del terreno para el distrito de Chorrillos, se propone un plano de Microzonificación Geotécnica, que incluye la capacidad de carga admisible de una cimentación corrida de una edificación convencional. El criterio de diseño de una cimentación considera que para garantizar el comportamiento satisfactorio de las estructuras, se deben cumplir las dos condiciones siguientes:

- a. La cimentación debe ser segura contra la falla de corte del suelo que la soporta, y
- b. Los asentamientos producidos por la carga transmitida por la cimentación deben ser menores que los permisibles para cada tipo de edificación.

En consecuencia, considerando que se cumplan estas dos condiciones, se ha realizado el cálculo de la capacidad de carga admisible para la cimentación de una vivienda convencional, consistente en un cimiento corrido de 0.60 m de ancho y profundidades de cimentación variable en función al tipo de suelo encontrado en las diferentes zonas del distrito de Chorrillos. Para tal fin, se ha utilizado la teoría de capacidad de carga de Terzaghi, con los factores de capacidad de carga propuestos por Vesic (1973). Para la evaluación de la capacidad de carga admisible se han utilizado los parámetros de resistencia cortante de los diferentes estudios con fines de cimentación recopilados. En la Tabla B-8 (Sección Tablas del Apéndice B), se muestran los cálculos de capacidad de carga admisible y asentamiento.

Los resultados del análisis químico, registrados en los diferentes estudios recopilados, demuestran en su mayoría que no existen problemas de agresión de suelos a los elementos de cimentación, dado que la presencia de sales solubles en el agua varía de 39.7 a 1000 ppm, menor que 1000 ppm y la cantidad de sales solubles totales varía de 105 a 5680 ppm, menor que 15000. Sin embargo, se han encontrado registros de zonas con valores altos de sulfatos como es el caso del estudio E-24 (Anexo B-2, Apéndice B) ubicado en la Asociación de Ex Trabajadores de Enatru Perú, localizado entre la Urb. Los Cedros de Villa, y el Club Deportivo de Lima; y del estudio E-43 (Anexo B-2, Apéndice B) ubicado en la zona sur oeste de la Urb. Los Huertos de Villa, en ambos casos muestran un grado de alteración químico

ligeramente severo. En el caso de los estudios E-31 (Anexo B-2, Apéndice B) y E-72 (Anexo B-2, Apéndice B), ubicados en la intersección de la Av. Huaylas y la Av. 12 de octubre, y en el centro recreacional de Chorrillos respectivamente, se tiene registrado un valor que indica un grado de alteración químico moderado. Debido a la presencia de elementos nocivos para la cimentación en estos lugares, se recomienda que el concreto utilizado para las cimentaciones sea elaborado con cementos tipo II, V o puzolánicos (IP) que presentan una alta resistencia a los sulfatos. En las Tablas B-6 y B-7 (Apéndice B) se presentan los valores de los resultados de ensayos químicos recopilados y los límites permisibles de elementos químicos nocivos para la cimentación, respectivamente.

En función a los perfiles estratigráficos y tipos de suelos identificados en las diferentes áreas del distrito de Chorrillos, se ha dividido el área de estudio en cuatro zonas, tal como se describe a continuación:

**Zona I:** Esta zona está conformada por el área circundante al afloramiento rocoso del Morro Solar, y está constituida generalmente por arenas pobremente gradadas (SP) con restos de conchuelas, arena arcillosa y arena limosa (SC, SM) de compacidad media a densa; a partir de los 2.00 m de profundidad en promedio, se encuentra el estrato de grava. En otros lugares muy puntuales se encuentra superficialmente la roca fracturada con matriz arenosa limosa. La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho varía de 2  $\text{kg/cm}^2$  a 4.0  $\text{kg/cm}^2$  a la profundidad de cimentación de 0.60 m a 1.60 m.

**Zona II:** Esta zona está conformada por la Zona II-A y Zona II-B, las cuales rodean a la Zona I.

La Zona II-A, corresponde a la zona del sector Norte del distrito de Chorrillos, colindante con el distrito de Barranco. El perfil estratigráfico está conformado superficialmente por estratos de arenas y limos intercalados con lentes de arcillas de espesor variable, llegando hasta profundidades menores a 10 m., subyaciendo a estos materiales y a profundidades variadas, se encuentra un estrato de grava subredondeada con matriz arenosa de compacidad media a densa. La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m

de ancho varía de 1.00 kg/cm<sup>2</sup> a 1.50 kg/cm<sup>2</sup> a la profundidad de cimentación de 1.20 m a 1.80 m.

La Zona II-B, esta zona se localiza entre el sector Suroeste a Sureste del distrito de Chorrillos. El perfil estratigráfico está conformado por rellenos de espesor variado que llegan hasta 1m de profundidad. Subyaciendo a éstos suelos se encuentran arenas finas eólicas, las cuales alcanzan profundidades menores a 10.0 m. En esta zona también se incluye el sector comprendido entre las Avs. Alameda Sur, Machu Picchu, Los Kipus y San Lorenzo cuyo terreno de fundación está conformado generalmente por estratos de arenas eólicas de 4m, seguido por la grava mal gradada de partículas sub redondeadas con matriz arenosa, medianamente densa a densa. En general el terreno de cimentación está conformado por el estrato de arena mal gradada con limo en estado húmedo a seco, de compacidad media densa a densa, cuyas características de resistencia proporcionan valores de capacidad de carga de 0.9 a 1.3 kg/cm<sup>2</sup>, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho a la profundidad de cimentación de 1.50 m a 2.20 m.

**Zona III:** Esta zona se localiza en el sector Suroeste del distrito de Chorrillos. El perfil estratigráfico en esta zona está conformado predominantemente por arenas eólicas limosa y arena eólicas mal gradadas que se caracterizan por tener una compacidad suelta de 0 a 1 m, y compacidad firme hasta mayores profundidades, con regular contenido de sulfatos. En algunos estudios ejecutados y recopilados entre 0 a 2.5 m de profundidad, se ha identificado lentes de limos ML y arcillas arenosas CL, arcillas orgánicas OH y arcillas CH de alta plasticidad, de consistencia blanda y saturada. De acuerdo a los estudios geotécnicos, el nivel freático varía de 0.8 m a 3.5 m. En general, el terreno de cimentación está conformado por el estrato de arena fina de gran potencia, las cuales se encuentran en estado húmedo a saturada, suelta a semi densa, cuyas características de resistencia indican valores de capacidad de carga de 0.80 a 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho a la profundidad de cimentación de 2.00 m a 2.50 m.

**Zona IV:** Esta zona incluye el área localizada en la parte Sur del distrito de Chorrillos, y está conformada por los terrenos pantanosos conocidos como los “Pantanos de Villa”, parte Noreste del Country Club de Villa,

Club Las Garzas Reales, y el área colindante con los pantanos y que cruza la Av. Huaylas hasta la calle Virgen de Chapi.

El perfil estratigráfico en los pantanos, está conformado superficialmente por suelos limo-arcillosos de compacidad media, continúa la turba de color negro a verde amarillento, en estado de descomposición, olor fétido y con intercalaciones de arena limosa. Subyace a este material una arena compacta gris oscura intercalada con lentes de turba y gran cantidad de sales, la cual se encuentra a profundidades de 6.0 a 7.0 m. En general estos tipos de suelos son altamente compresibles. El nivel freático es superficial.

En los pantanos, debido a que está delimitada como reserva ecológica, no debe permitirse la construcción de ningún tipo de edificación.

En los terrenos del Country Club de Villa, se presentan de 0 a 0.90 m un estrato de material compuesto por turba y suelo orgánico de plasticidad alta, blanda y saturada, seguido por las arenas finas limosas medianamente densas a muy densas, en estado saturado y no plástico hasta una profundidad de 20 m.

En el área colindante con los pantanos, y que llega hasta la calle Virgen de Chapi, se presentan estratos de arenas finas mal gradadas con limos, sueltas a media densas, en estado saturado. En ambos casos, el nivel freático varía de 0.8 a 1.5 m.

Las características de resistencia descritas para estos suelos, hacen que presenten baja capacidad portante para cimentaciones superficiales, siendo común utilizar cimentaciones profundas para transmitir las cargas a estratos más competentes.

En esta Zona IV, se incluyen también las áreas de laderas del Morro Solar y de los Acantilados de Chorrillos clasificadas como de alto peligro por problemas de estabilidad de taludes, y cuya evaluación se detalla en el Anexo B-4 del Apéndice B.

De la evaluación para la estabilidad de taludes de las laderas del Morro, se ha identificando la existencia de zonas que presentan un alto peligro

para la vida de los pobladores y viviendas, por desprendimiento de material superficial de los taludes. Por lo tanto, considerando la actividad sísmica propia de la costa, se ha determinado a esta zona como de alta peligrosidad ante un evento sísmico.

La evaluación de estabilidad para los acantilados de Chorrillos, se basa en el análisis realizado por García (1984). En ese estudio, se efectuó un análisis general de los acantilados de Lima incluyendo Chorrillos.

Se recomienda hacer estudios más específicos de estabilidad de las zonas antes mencionadas, tomando en cuenta la topografía actualizada de las mismas y las propiedades particulares de resistencia de los suelos que las componen.

El plano de microzonificación geotécnica realizado en base a la descripción arriba indicada se presenta en el Plano P-05 del Apéndice B.

## **V. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUBSUELO DE CHORRILLOS.**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En la actualidad se reconoce la importancia de las condiciones locales de sitio, como uno de los principales factores responsables de los daños sufridos por las edificaciones durante los sismos fuertes. La amplificación sísmica es un efecto de las condiciones locales de sitio y es fuertemente dependiente de las condiciones geológicas y topográficas de la zona en consideración.

Para evaluar los efectos de las condiciones locales de sitio sobre la respuesta dinámica de los suelos en el distrito de Chorrillos se han empleado los siguientes métodos:

- Ensayos de medición de ondas de corte – método MASW
- Ensayos de medición de Microtrepidaciones.

Detalles de los resultados de los ensayos ejecutados se encuentran en el Apéndice C.

## 5.2 ENSAYOS DE MEDICIÓN DE ONDAS DE CORTE – MÉTODO MASW

Con el objeto de determinar la velocidad de propagación de las ondas S ( $V_s$ ) y el periodo de vibración fundamental del terreno en el área de estudio, se han realizado ensayos geofísicos por el método MASW y medición de Microtrepidaciones. Los ensayos nos permiten obtener los perfiles de ondas S. información que es necesaria para realizar una estimación indirecta de las características estratigráficas de los suelos que se encuentran a diferentes profundidades y determinar sus propiedades dinámicas.

En el área de estudio se han realizado 22 ensayos MASW con un total de 1436 m de longitud. La ubicación de las líneas sísmicas ejecutadas en las zonas de estudio se presenta en el Plano P-01 del Apéndice C y en la Tabla 1 del Apéndice C se presenta un listado de los sondajes realizados.

### 5.2.1 Fundamento Teórico

El Ensayo MASW o Análisis de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía del subsuelo bajo un punto en forma indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. Este método consiste en la interpretación de las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) de un registro en arreglo multicanal, generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno, obteniéndose el perfil de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) para el punto central de dicha línea.

La interpretación de los registros consiste en obtener de ellos una curva de dispersión (un trazado de la velocidad de fase de las ondas superficiales versus la frecuencia), filtrándose solamente las ondas superficiales ya que su velocidad de fase se aproxima en un 90 a 95% del valor de  $V_s$ , y luego mediante un cálculo inverso iterativo (método de inversión) se obtiene el perfil  $V_s$  desde la curva de dispersión calculada para cada punto de estudio. Con los

equipos utilizados, la profundidad de exploración varía de 25 a 30 m en promedio.

### 5.2.2 Trabajos de Campo

Para realizar el ensayo de MASW se utilizó un equipo de prospección geofísica ES 3000, desarrollado por la empresa GEOMETRICS el cual tiene las siguientes características:

- 12 canales de entrada, cada uno tiene un convertidor A/D individual con resolución 24bit y alta velocidad de muestreo.
- 13 sensores o geófonos de 4.5Hz de frecuencia, los cuales permiten registrar las vibraciones ambientales del terreno producidas por fuentes naturales o artificiales y el arribo de las ondas P y ondas S generadas por las fuentes de energía.
- Computadora portátil, Lap Top Pentium IV.
- Un cable de conectores de geófonos de 180 m de longitud.
- Radios de comunicación y accesorios varios.

Los registros de las ondas sísmicas obtenidas con el equipo ES 3000 en cada una de las líneas de exploración pueden ser procesados en el campo en forma preliminar y en forma definitiva en el gabinete, utilizando para ello programas de cómputo que permiten obtener las velocidades de propagación de las ondas S.

En los trabajos de campo que se realizó en cada ensayo de MASW primeramente se definió el eje del sondaje sísmico. Luego se procedió a instalar los geófonos y los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. El espaciamiento entre geófonos es definido en función de la profundidad de exploración requerida. En el presente trabajo, en función a la topografía y a los requerimientos del estudio, se realizaron líneas MASW de 38 m, 53 m y 72 m de longitud. La fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas fue un martillo de 25 lbs.

Se realizaron en total 22 sondajes cuya longitud de separación entre sensores o geófonos fue de 2m para las líneas de 38m, de 3 m para las líneas de 53 m y de 4 m para las líneas de 72m. La ubicación de los sondajes MASW ejecutados en el distrito de

Chorrillos se presentan en el Plano P-01 del Apéndice C, los registros de las ondas sísmicas se presentan en el Anexo C-1 del Apéndice C. Así mismo, en el Anexo C-5 del Apéndice C se presenta el panel fotográfico que documenta las diferentes actividades realizadas en el trabajo de campo, durante la realización de estos ensayos.

### **5.2.3 Perfiles Sísmicos**

Con los registros de las ondas sísmicas obtenidos en cada una de las líneas de exploración realizadas, que se presentan en el Anexo C-1, Apéndice C, y representan las llegadas de las ondas superficiales a cada uno de los geófonos ubicados a distancias especificadas, se determinan las curvas de dispersión, las cuales se muestran en el Anexo C-2, Apéndice C. Con esta información se realizó la interpretación de los sondajes sísmicos del área investigada, los cuales se presentan en las Figuras 01 a 21 del Anexo C-3, Apéndice C, y cuya descripción se presenta a continuación.

#### **Sondaje MASW-01**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 1, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 250 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada, limosa, media densa.

El segundo estrato, de 4 a 14 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 450 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada, muy densa.



El tercer estrato, de 14 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 600 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava muy densa.

### **Sondaje MASW-02**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 2, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 260 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada, media densa.

El segundo estrato, de 4 a 16 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 390 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por arena pobremente gradada, densa.

El tercer estrato, de 16 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 500 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena, muy densa.

### **Sondaje MASW-03**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 3, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 270 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material

compuesto por una arena pobremente gradada con limo, media densa.

El segundo estrato, de 5 a 17 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 370 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena con limo, media densa.

El tercer estrato, de 17 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 500 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava densa.

#### **Sondaje MASW-04**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 4, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 290 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada con limo, media densa.

El segundo estrato, de 5 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 380 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa media densa.

El tercer estrato, de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 480 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava densa.

#### **Sondaje MASW-05**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 5, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables

hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 270 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena arcillosa, media densa.

El segundo estrato, de 4 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 420 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

El tercer estrato, de 13 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 600 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

El cuarto estrato, de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 750 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una roca alterada.

#### **Sondaje MASW-06**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 6, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 140 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por un limo con arena media suelta.

El segundo estrato, de 7 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 270 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media suelta.

El tercer estrato, de 13 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 340

m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

### **Sondaje MASW-07**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 7, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 220 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada con limo, de suelta a media densa.

El segundo estrato, de 5 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada media densa.

El tercer estrato, de 13 a 21 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 420 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava, media densa.

El cuarto estrato, de 21 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 520 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava, densa.

### **Sondaje MASW-08**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 8, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 5 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 240

m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena limosa, media densa.

El segundo estrato, de 5 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava pobremente gradada, limosa, media densa.

El tercer estrato, de 13 a 21 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 400 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

El cuarto estrato, de 21 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 490 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa densa.

### **Sondaje MASW-09**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 9, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 160 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por un material compuesto por una arena pobremente gradada, con limo, de suelta a muy suelta.

El segundo estrato, de 4 a 10 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 250 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada, media densa.

El tercer estrato, de 10 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 360

m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada densa.

El cuarto estrato, de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 460 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena muy densa.

### **Sondaje MASW-10**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 10, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 6 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena limosa, media densa.

El segundo estrato, de 6 a 10 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 500 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, pobremente gradada densa.

El tercer estrato, de 10 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 650 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava, de densa a muy densa.

El cuarto estrato, de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 810 m/s. Este valor de velocidad correspondería a una grava muy densa.

### **Sondaje MASW-11**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 11, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables

hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 2m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena arcillosa, media densa.

El segundo estrato, de 2 a 11 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 470 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

El tercer estrato, de 11 a 16 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 590 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa densa.

El cuarto estrato, de 16 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 670 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una roca alterada.

### **Sondaje MASW-12**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 12, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 210 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena con limo, media densa.

El segundo estrato, de 4 a 11 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 350 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa pobremente gradada, media densa.

El tercer estrato, de 11 a 15 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 490 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

El cuarto estrato, de 15 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 600 m/s. Este valor de velocidad de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, muy densa.

### **Sondaje MASW-13**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 13, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 8 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 200 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por arena limosa, media densa.

El segundo estrato, de 8 a 15 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 310 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

El tercer estrato, de 15 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 430 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

### **Sondaje MASW-14**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 14, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 25 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.



El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 220 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arcilla limosa de consistencia media, con intercalaciones de arena media densa.

El segundo estrato, de 4 a 11 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 310 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arcilla limosa de consistencia semi dura, con intercalaciones de arena densa.

El tercer estrato, de 11 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 390 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

El cuarto estrato, de 18 a 25 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 510 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

#### **Sondaje MASW-15**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 15, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 8 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 270 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arcilla limosa de consistencia media, con intercalaciones de arena media densa.

El segundo estrato, de 8 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 350 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

El tercer estrato, de 13 a 20 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 450 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

El cuarto estrato, de 20 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 540 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

### **Sondaje MASW-16**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 16, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 220 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena limosa, media densa.

El segundo estrato, de 4 a 9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa, con intercalaciones de arcilla.

El tercer estrato, de 9 a 18 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 370 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa con intercalaciones de arcilla.

El cuarto estrato, de 18 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 450 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, densa.

### **Sondaje MASW-17**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 17, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 4 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 250 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena con limo media densa.

El segundo estrato, de 4 a 14 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 380 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

El tercer estrato, de 14 a 21 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 490 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

El cuarto estrato, de 21 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 580 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una roca fracturada.

### **Sondaje MASW-18**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 18, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 300 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada con limo, media densa.

El segundo estrato, de 7 a 21 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 420 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava con arena, media densa.

El tercer estrato, de 21 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 550 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava densa.

### **Sondaje MASW-19**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 19, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de tres estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 9 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 280 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada con limo, media densa.

El segundo estrato, de 9 a 20 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 440 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava con arena densa.

El tercer estrato, de 20 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 560 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava densa.

### **Sondaje MASW-20**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 20, de 72 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 6 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 150 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por un relleno.

El segundo estrato, de 6 a 10 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 240 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena pobremente gradada con limo, media densa.

El tercer estrato, de 10 a 16 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 340 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena con limo, densa.

El cuarto estrato, de 16 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 460 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava densa.

#### **Sondaje MASW-21**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 21, de 38 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 20 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 2 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 140 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por relleno.

El segundo estrato, de 2 a 7 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 230 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena limosa, media densa.

El tercer estrato, de 7 a 13 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 330

m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, media densa.

El tercer estrato, de 13 a 20 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 380 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava arenosa, de media densa a densa.

### **Sondaje MASW-22**

Este sondaje corresponde a un ensayo MASW, el cual se encuentra conformado por la línea sísmica denominada Línea 22, de 53 m de longitud. La interpretación de este ensayo genera un sondaje de velocidades de ondas S con resultados confiables hasta una profundidad de 30 m en el punto central de la línea, el cual muestra la presencia de cuatro estratos sísmicos.

El primer estrato, de 0 a 3 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 180 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por un limo arenoso, suelto.

El segundo estrato, de 3 a 10 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 280 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una arena media densa, con presencia de partículas de grava.

El tercer estrato, de 10 a 21 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 380 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava, de media densa a densa.

El cuarto estrato, de 21 a 30 m de profundidad, presenta un valor promedio de velocidad de propagación de ondas S ( $V_s$ ) de 450 m/s. Este valor de velocidad correspondería a un material compuesto por una grava, densa.

## **5.3 MEDICIÓN DE MICROTREPIDACIONES**

La medición de microtrepidaciones es una de las técnicas más

empleadas actualmente en estudios de microzonificación sísmica, debido a la facilidad con que se realizan las mediciones y al uso de la técnica propuesta por Nakamura (1989) para determinar periodos predominantes y factores de amplificación relativa, usando relaciones espectrales entre las componentes horizontales y vertical de las mediciones. Esta técnica ha sido usada con éxito en varias ciudades del mundo y en nuestro país se utiliza desde hace 20 años en la elaboración de mapas de microzonificación sísmica.

### 5.3.1 Marco Teórico

Las microtrepidaciones son vibraciones naturales o ambientales del terreno generadas por fuentes naturales o artificiales. Éstas se usan para estimar las características de vibración del terreno durante un sismo, así como para conocer la estructura del subsuelo y modelar los efectos de sitio usando dicho modelo estructural del terreno. Las microtrepidaciones también son conocidas como microtremores, microsismos, ruido sísmico de fondo, campo natural, vibración o ruido ambiental, oscilaciones omnipresentes o microtemblores (Flores, 2004).

Se ha utilizado la técnica propuesta por Nakamura (1989) para determinar periodos predominantes y factores de amplificación relativa, usando relaciones espectrales entre la componente horizontal y vertical de los registros de ondas.

#### Fundamento del Método de Nakamura

El método de Nakamura consiste en calcular la amplificación del terreno a partir del valor máximo del cociente espectral entre los componentes del movimiento horizontal y vertical en la superficie.

$$S_{IT} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{VS}}}{\frac{S_{HB}}{S_{VB}}} = \frac{R_S}{R_B}$$

Con esta relación Nakamura supone que los efectos de la fuente pueden ser removidos de los registros de microtrepidaciones con el espectro H/V. Él asume que sólo las microtrepidaciones

horizontales son influenciadas por el suelo, y que las características espectrales de la fuente se mantienen en las microtrepidaciones verticales. Diversos investigadores han confirmado que los espectros H/V pueden proveer características más estables que los espectros de frecuencia (Espectro de Amplitudes de Fourier) de las microtrepidaciones, como comúnmente se han estado evaluando. Ampliación del fundamento teórico de esta técnica se encuentra en el Apéndice C.

### 5.3.2 Trabajos de Campo

Para este ensayo fue utilizado el siguiente equipo:

- 01 Sistema de Adquisición de Datos GEODAS 15-HS
- 01 Computadora portátil NEC, modelo VersaPro VS-8
- 03 sensores para medición de velocidad del suelo tipo CR4.5-1S
- 01 GPS GARMIN modelo GPS16x-LVS
- Cables de 50 m de longitud.
- 01 cable de conexión para batería
- Software de adquisición de datos: Microtremor Observation
- Software de procesamiento de datos: calHVm4.

En cada punto se tomaron mediciones de velocidad, descompuesta en tres direcciones ortogonales, las cuales coinciden con las dos direcciones horizontales: longitudinal y transversal, así como con la dirección vertical respectivamente.

El sistema permite visualizar y registrar las vibraciones ambientales a diferentes frecuencias de muestreo. Una vez que las ondas hayan sido grabadas en el disco duro de la computadora, éstas pueden ser procesadas inmediatamente, mediante un software incorporado que permite determinar los espectros de Fourier, las relaciones espectrales H/V y las relaciones espectrales entre dos registros de diferentes lugares. Mediante este procesamiento rápido se puede evaluar en campo la calidad de las mediciones, en función a lo cual se podrá determinar si se debe realizar mediciones adicionales.



Las mediciones de microtemores son realizadas sobre la superficie del terreno o a diferentes profundidades dentro de una perforación, utilizando sensores suficientemente sensibles. Estas mediciones registran las velocidades de los microtemores, las que luego son almacenadas en forma digital, para su posterior procesamiento en gabinete. Para realizar la medición se instala el sensor triaxial en la superficie del terreno, orientando sus componentes horizontales en las direcciones E-W y N-S. Luego de conectar e instalar todo el equipo se procede a registrar los microtemores por un lapso de tiempo lo suficientemente largo para garantizar que se registren tramos de ondas sin interferencias directas por el paso de vehículos o personas en las zonas próximas al sensor.

En el presente estudio, para el distrito de Chorrillos se realizó la medición de microtemores en 50 puntos, con el objetivo de complementar las mediciones realizadas en este distrito en anteriores estudios. La localización de estos puntos así como de mediciones realizadas en la tesis, “Microzonificación Sísmica de Chorrillos y Barranco” (Ayquipa, 1995) se presenta en el Plano P-02 del Apéndice C. Los registros de las microtempidaciones obtenidos en diversos puntos del distrito se presentan en el Anexo C-4 del Apéndice C.

### **5.3.3 Discusión de Resultados**

En el Plano P-03 del Apéndice C se presentan las curvas de isoperíodos dominantes del terreno determinada para el distrito de Chorrillos en función del análisis de los resultados obtenidos de la medición de microtemores en diferentes puntos, tanto ejecutados en este estudio como de estudios anteriores.

Los 50 nuevos puntos ejecutados que han sido analizados mediante el espectro de amplitudes de Fourier y el cociente espectral H/V, han ayudado a identificar con mayor detalle las zonas en que los periodos varían desde 0.10 s. en zonas de suelo gravoso o roca, hasta 0.40 s. en las zonas de suelos pantanosos, arenosos y suelos finos con mayor potencia, reflejando de alguna manera a las características geológicas y geotécnicas que se encuentran en la zona en estudio. En la parte central del distrito y

hacia el Noroeste el período predominante del suelo es de 0.10 s. Hacia el Este los valores del periodo se encuentran entre 0.10 s y 0.40 s. Hacia el Norte los periodos varían entre 0.20 y 0.30 s. Hacia el Sur los valores se encuentran entre 0.20 y 0.40 s. Hacia el Oeste los valores son de 0.20 a 0.30 s.

El cociente espectral H/V proporciona el valor de amplificación relativa del movimiento horizontal del suelo con respecto a su movimiento vertical. La Tabla 5 del Apéndice C presenta estos valores de amplificación relativa. Se observa que en la zona Norte los valores de amplificación varían de 2 a 7.5 veces, en la parte central del distrito los valores varían de 2 a 8.6 veces y en la zona Sur de 2.4 a 12.7 veces. Estos valores han sido obtenidos de las 50 mediciones realizadas en este estudio, los valores de periodo del suelo obtenidos del estudio de Ayquipa (1995) se obtuvieron analizando sólo el Espectro de Amplitudes de Fourier (EAF) de las señales obtenidas en los ensayos de campo (dos horizontales y una vertical), método que no proporciona la amplificación relativa.

## VI. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

El mapa de microzonificación sísmica se elabora en función de la superposición de los resultados obtenidos del mapa de microzonificación geotécnica y el mapa de curvas de isoperiodos .

Producto de esta superposición se ha subdividido el distrito de Chorrillos en cuatro zonas, las cuales se describen a continuación.

**Zona I:** Esta zona está conformada por el área circundante al afloramiento rocoso del Morro Solar, y está constituida generalmente por arenas pobremente gradadas (SP) con restos de conchuelas, arena arcillosa y arena limosa (SC, SM) de compacidad media a densa; a partir de los 2.00 m de profundidad en promedio, se encuentra el estrato de grava. En otros lugares muy puntuales se encuentra superficialmente la roca fracturada con matriz arenosa limosa. La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho varía de 2 kg/cm<sup>2</sup> a 4.0 kg/cm<sup>2</sup> a la profundidad de cimentación de 0.60 m a 1.60 m.

El comportamiento dinámico del suelo en esta zona es adecuado, se espera que no se incremente el nivel de peligro sísmico estimado, excepto en las

áreas de fuerte pendiente y en las partes altas de los cerros, que pueden presentar amplificaciones por efectos topográficos. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.10 s a 0.20 s. Los valores de amplificación relativa del suelo obtenido por microtrepidaciones varían de 2.4 a 4.6 veces.

**Zona II:** Esta zona está conformada por la Zona II-A y Zona II-B, las cuales rodean a la Zona I.

La Zona II-A, corresponde a la zona del sector Norte del distrito de Chorrillos, colindante con el distrito de Barranco. El perfil estratigráfico está conformado superficialmente por estratos de arenas y limos intercalados con lentes de arcillas de espesor variable, llegando hasta profundidades menores a 10 m., subyaciendo a estos materiales y a profundidades variadas, se encuentra un estrato de grava sub-redondeada con matriz arenosa de compacidad media a densa. La capacidad de carga admisible para una cimentación corrida de 0.60 m de ancho varía de 1.00 kg/cm<sup>2</sup> a 1.50 kg/cm<sup>2</sup> a la profundidad de cimentación de 1.20 m a 1.80 m.

En esta zona se espera un incremento moderado del nivel de peligro sísmico estimado por efecto del comportamiento dinámico del suelo. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.10 s a 0.30 s. Los valores de amplificación relativa del suelo obtenido por microtrepidaciones varían de 3.1 a 7.3 veces.

La Zona II-B, esta zona se localiza entre el sector Suroeste a Sureste del distrito de Chorrillos. El perfil estratigráfico está conformado por rellenos de espesor variado que llegan hasta 1m de profundidad. Subyaciendo a éstos suelos se encuentran arenas finas eólicas, las cuales alcanzan profundidades menores a 10.0 m. En esta zona también se incluye el sector comprendido entre las Avs. Alameda Sur, Machu Picchu, Los Kipus y San Lorenzo cuyo terreno de fundación está conformado generalmente por estratos de arenas eólicas de 4m, seguido por la grava mal gradada de partículas sub redondeadas con matriz arenosa, medianamente densa a densa. En general el terreno de cimentación está conformado por el estrato de arena mal gradada con limo en estado húmedo a seco, de compacidad media densa a densa, cuyas características de resistencia proporcionan valores de capacidad de carga de 0.9 a 1.3 kg/cm<sup>2</sup>, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho a la profundidad de cimentación de 1.50 m a 2.20 m.

En esta zona se espera un incremento moderado del nivel de peligro sísmico estimado por efecto del comportamiento dinámico del suelo; la existencia de zonas de pendiente fuerte indican amplificación por efectos topográficos. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.20 s a 0.40 s. Los valores de amplificación relativa del suelo obtenido por microtrepidaciones varían de 4.3 a 8.1 veces.

**Zona III:** Esta zona se localiza en el sector Suroeste del distrito de Chorrillos. El perfil estratigráfico en esta zona está conformado predominantemente por arenas eólicas limosa y arena eólicas mal gradadas que se caracterizan por tener una compacidad suelta de 0 a 1 m, y compacidad firme hasta mayores profundidades, con regular contenido de sulfatos. En algunos estudios ejecutados y recopilados entre 0 a 2.5 m de profundidad, se ha identificado lentes de limos ML y arcillas arenosas CL, arcillas orgánicas OH y arcillas CH de alta plasticidad, de consistencia blanda y saturada. De acuerdo a los estudios geotécnicos, el nivel freático varía de 0.8 m a 3.5 m. En general, el terreno de cimentación está conformado por el estrato de arena fina de gran potencia, las cuales se encuentran en estado húmedo a saturada, suelta a semi densa, cuyas características de resistencia indican valores de capacidad de carga de 0.80 a 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho a la profundidad de cimentación de 2.00 m a 2.50 m.

El comportamiento dinámico del terreno en esta zona es desfavorable, se espera un fuerte incremento del nivel de peligro sísmico. Los periodos dominantes del suelo tienen valores de 0.20 s a 0.40 s. Los valores de amplificación relativa del suelo obtenido por microtrepidaciones varían de 3.2 a 12.7 veces.

**Zona IV:** Esta zona incluye el área localizada en la parte Sur del distrito de Chorrillos, y está conformada por los terrenos pantanosos conocidos como los “Pantanos de Villa”, parte Noreste del Country Club de Villa, Club Las Garzas Reales, y el área colindante con los pantanos y que cruza la Av. Huaylas hasta la calle Virgen de Chapi.

El perfil estratigráfico en los pantanos, está conformado superficialmente por suelos limo-arcillosos de compacidad media, continúa la turba de color negro a verde amarillento, en estado de descomposición, olor fétido y con intercalaciones de arena limosa. Subyace a este material una arena compacta gris oscura intercalada con lentes de turba y gran cantidad de sales, la cual se

encuentra a profundidades de 6.0 a 7.0 m. En general estos tipos de suelos son altamente compresibles. El nivel freático, es superficial.

En los pantanos, debido a que está delimitada como reserva ecológica, no debe permitirse la construcción de ningún tipo de edificación.

En los terrenos del Country Club de Villa, se presentan de 0 a 0.90 m un estrato de material compuesto por turba y suelo orgánico de plasticidad alta, blanda y saturada, seguido por las arenas finas limosas medianamente densas a muy densas, en estado saturado y no plástico hasta una profundidad de 20 m.

En el área colindante con los pantanos, y que llega hasta la calle Virgen de Chapi, se presentan estratos de arenas finas mal gradadas con limos, sueltas a media densas, en estado saturado. En ambos casos, el nivel freático varía de 0.8 a 1.5 m.

Las características de resistencia descritas para estos suelos, hacen que presenten baja capacidad portante para cimentaciones superficiales, siendo común utilizar cimentaciones profundas para transmitir las cargas a estratos más competentes.

En esta Zona IV, se incluyen también las áreas de laderas del Morro Solar y de los Acantilados de Chorrillos clasificadas como de alto peligro por problemas de estabilidad de taludes, y cuya evaluación se detallada en el Anexo B-4 del Apéndice B.

De la evaluación para la estabilidad de taludes de las laderas del Morro, se ha identificando la existencia de zonas que presentan un alto peligro para la vida de los pobladores y viviendas, por desprendimiento de material superficial de los taludes. Por lo tanto, considerando la actividad sísmica propia de la costa, se ha determinado a esta zona como de alta peligrosidad ante un evento sísmico.

El comportamiento dinámico del suelo en esta zona es el más desfavorable, es el área del distrito de Chorrillos que esta expuesta a los más altos niveles de peligro sísmico y en donde se han presentado los mayores daños en sismos pasados. Los periodos dominantes del suelo tienen valores para la zona IV A de 0.10 s a 0.20 s, para la zona IV B los valores se encuentran

entre 0.3 s y 0.4 s Los valores de amplificación relativa del suelo obtenido por microtrepidaciones varían de 4.6 a 9.1 veces.



## VII. REFERENCIAS

Alva Hurtado J.E., Meneses J. y Guzmán V. (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.

Ayquipa C. (1995), "Microzonificación Sísmica de Chorrillos y Barranco", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

Ayashi, K (2003), "Data Acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods". Short Course - SAGEEP 2003.

Bard, P. (1998), Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation? The effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Kudo, Okada y Sasatani (eds), 1251-1279.

Bermúdez M., Franco L., Martínez S. y Ojeda A., (2002) "Uso de las Microtrepidaciones para la evaluación de la Respuesta Dinámica de los Suelos"

Berrocal J., (1974), "South American Seismotectonics from SAAS data", Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Edinburg.

Berrocal J., Deza E. y Shikiya J. (1975), "Estudio de Sismicidad para el Proyecto de Derivación del Río Mantaro a Lima", Informe del Instituto Geofísico del Perú a ELECTROPERU S.A.

Bieniawski Z.T (1989) " Engineering Rock Mass Clasificación "Willey Intersciencie Publicación , USA.

Casaverde L. y Vargas J. (1980), "Zonificación Sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, Organización de Estados Americanos y Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Castillo J. (1993), "Peligro Sísmico en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

CISMID (1991), "Memorias del Seminario Taller de Dinámica de Suelos". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

CISMID (1992), "Estudio de Peligro Sísmico para el Afianzamiento Hídrico del Río Cañete – Lima". Informe Técnico, Lima, Perú.

CISMID (2004), "Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de 32 distritos de Lima y Callao". Informe Técnico, Lima, Perú

- Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 58, N°5 págs. 1538-1606.
- Das, B. M. (1996), "Principios de Ingeniería de Cimentaciones", México Thomson Editores , 4ta Edición, México.
- Deza E. y Carbonell C. (1978), "Regionalización Sismotectónica Preliminar del Perú", IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
- Deza E. (1969), "Estudio Preliminar Sobre las Zonas de Transición que Separan Posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de Sudamérica: Zona de Transición en el Perú", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.
- Figuerola, J., C. (1974), "Tratado de Geofísica Aplicada", LITOPRINT, Madrid.
- González de Vallejo, L. y Ferrer M. (2002), "Ingeniería Geológica", Prentice Hall, Madrid, España.
- Hoek E. Bray J .W (1977) "Rock Slope Engineering "London , 2da Edición.
- Idriss I. (1985), "Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice". XI International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, USA, Vol.
- Hunt, Roy E (1986), "Geotechnical Engineering – Techniques and Practices", McGraw-Hill, USA.
- Instituto Geofísico del Perú. (2000), "Catálogo Sísmico del Perú: Versión Revisada y Actualizada". Lima, Perú.
- INGEMMET "Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica "Boletín N°43 – Hoja:25-j, 1992.
- Instituto Tecnológico de España (1991) "Manual de Ingeniería de Taludes"
- Isacks B., Oliver J. y Sykes L.R., (1968), "Seismology and Global Tectonics", Journal of Geophysical Research, Vol 73, N°18, págs. 5855-5899.
- Kramer, S. L., (1996), "Geotechnical Earthquake Engineering". Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Lankston, R. W.,, "High Resolution Refraction Data Acquisition and Interpretation", Geo-Compu-Graph, Inc., U.S.A.
- Lermo J., Rodríguez M., y Singh S. K. Natural period of sites in the valley of Mexico from microtremor measurements, Earthquake Spectra, 1988, 4, 805-14.



- Lermo, J. and F. J. Chavez-Garcia (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am., 83,1350-1364.
- McGuire R.K. (1974), "Seismic Structural Response Risk Analysis incorporating Peak Response Regression on Earthquake Magnitude and Distance", MIT Report R74-51 Cambridge MA, USA.
- McGuire R.K. (1976), "Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis", Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey.
- Miller, R. D., Pullan, S.E., Waldner, J. S., Haeni, F. P., (1986), "Field comparison of shallow seismic sources", Geophysics, Vol. 51, N° 11, Pag. 2067 – 2092, U.S.A.
- Nakamura, Y. (1989). "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface". Quarterly Report Railway Technology. Research Institute., Vol. 30. N°3. pags. 25-30.
- Park, C., Miller, R. y Xía, J. 1999, "Multichannel analysis of surface waves". Geophysics. Vol. 64. N° 3. p: 800-808.
- Park., C.B., R. D. Miller, and J. Xia, Julian M.(1999), Multichannel Analysis of Surface Waves to Map Bedrock, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, U.S.
- Park, C., Miller, R., Xia, J., & Ivanov, J. 2001<sup>a</sup>. "Seismic characterization of geotechnical sites by Multichannel Analysis of Surfaces Waves (MASW) method". Tenth International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering (SDEE), Philadelphia.
- Redpath, B., B. (1973), "Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations", Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, U.S.A.
- Richter C.F. (1958), "Elementary Seismology", W.H. Freeman Co., San Francisco.
- Sebrier M., Huamán D., Blanc J.L, Macharé J., Bonnot D. y Cabrera J. (1982), "Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
- Silgado E., (1969), "Sismicidad de la Región Occidental de la América del Sur entre los paralelos 2° y 18° Latitud Sur", Primer Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, pp. 33-44.

Silgado E. (1973), "Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú 1955- 1970", Geofísica Panamericana, Vol 2 pp. 179-243

Silgado E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, Boletín N°3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.

Silgado E. (1992), "Investigación de Sismicidad Histórica en la América del Sur en los Siglos XVI, XVII, XVIII y XIX", CONCYTEC, Lima, Perú.

Slemmnons D. (1982), "Magnitude of Active Faults", U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, USA.

SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur" Vol 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.

Tavera, H., y E. Buforn. (1998), " Sismicidad y Sismotectónica de Perú", Física de la Tierra, N° 10, pp. 187 – 219. España.

U. S. Army Corps of Engineers, (1995), "Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations", Engineer Manual 1110-1-1802, Washington, U. S. A.

Underwood, D.; Hayashi, K. (2006), Surface Wave data Acquisition and Field Methods, Geometrics Inc, U.S.