



**PERÚ**

Ministerio  
de Vivienda, Construcción  
y Saneamiento

Viceministerio de  
Vivienda y Urbanismo

Programa Nuestras  
Ciudades



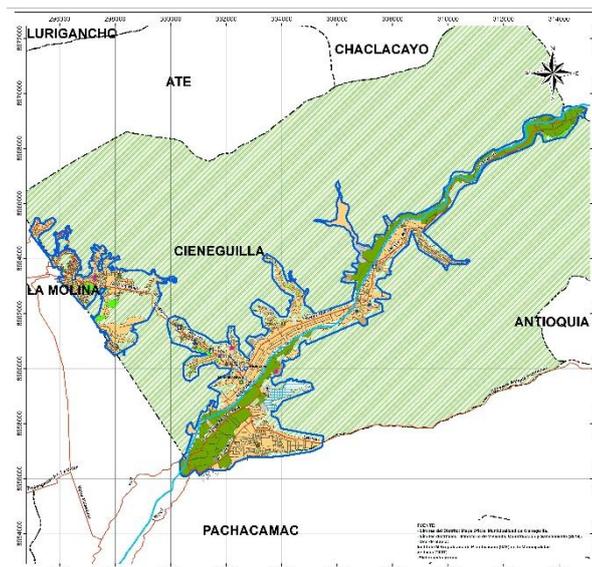
**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES  
SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES**



**CONVENIO DE COLABORACIÓN INTERINSTITUCIONAL ENTRE EL  
MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO Y LA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS  
ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO EN LAS  
ZONAS DE ESTUDIOS UBICADAS EN LAS ÁREAS URBANAS DE LA  
MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CIENEGUILLA (PROVINCIA Y  
DEPARTAMENTO DE LIMA)**

**PRODUCTO 02:  
DISTRITO DE CIENEGUILLA**

**TOMO II  
ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ANÁLISIS DE RIESGO  
EN LA ZONA DE ESTUDIO UBICADA EN EL DISTRITO DE  
CIENEGUILLA  
ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO DEL RIESGO**



**LIMA – DICIEMBRE 2019**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>2. OBJETIVO DEL ESTUDIO</b> .....	<b>9</b>
<b>3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>10</b>
<b>4. INFORMACIÓN RECOPIADA</b> .....	<b>10</b>
4.1. Estudios Geológicos y Geotécnicos.....	10
4.2. Datos Catastrales .....	11
4.3. Red de Agua.....	11
<b>5. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	<b>11</b>
5.1. Levantamiento Fotogramétrico y refinamiento de Modelo digital de Superficie.....	11
5.1.1. Levantamiento Fotogramétrico .....	11
5.1.1.1. Objetivo .....	11
5.1.1.2. Equipos utilizados en campo .....	12
5.1.1.3. Zonas de alto riesgo a inundaciones en el distrito de Cieneguilla .....	13
5.1.1.4. Reconocimiento de campo.....	14
5.1.1.5. Adquisición de imágenes aéreas .....	15
5.1.1.6. Procesamiento fotogramétrico .....	18
5.1.2. Refinamiento y elaboración de un Modelo Digital de Superficie (MDS) .....	20
5.1.2.1. Conceptos Previos.....	20
5.1.2.2. Relación entre superficie real, geoide y elipsoide .....	21
5.1.2.3. Recopilación de información .....	21
5.1.2.4. Procesamiento con sistemas de información geográfica (SIG) .....	22
5.2. Marco Geológico Regional.....	23
5.2.1. Geología Regional.....	23
5.2.1.1. Geomorfología Regional .....	23
5.2.1.2. Litología Regional .....	24
5.2.1.3. Geología Estructural Regional .....	29
5.2.2. Geología Histórica.....	30
5.3. Marco Geológico Local .....	31
5.3.1. Geomorfología Local .....	31
5.3.2. Litoestratigrafía Local .....	32
5.3.3. Aspectos Geo Estructurales Locales .....	34
<b>6. PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO</b> .....	<b>34</b>
6.1. Características Geomorfológicas .....	34
6.2. Neotectónica de las Principales Fuentes Sismogénicas .....	35
6.2.1. Emplazamiento Tectónico Regional.....	35
6.2.2. Zonificación Tectónica.....	37
6.2.3. Sistemas de Fallas en la Región Central del Perú .....	38
6.3. Sismotectónica Regional.....	39
6.3.1. Sismicidad del Área de Influencia .....	40
6.3.2. Historia Sísmica de la Región en Estudio .....	41
6.3.3. Sismicidad Instrumental en el Área de Influencia.....	43
6.4. Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico.....	43
6.4.1. Fundamentos .....	43
6.4.2. Evaluación y Caracterización de las Fuentes Sismogénicas .....	45
6.4.3. Estimación de Parámetros de Sismicidad Local .....	46
6.4.4. Atenuación de las Ondas Sísmicas .....	50
6.4.5. Determinación del Peligro Sísmico .....	53
6.5. Resultados.....	55
<b>7. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA</b> .....	<b>56</b>
7.1. Recopilación de Información Geotécnica.....	56



7.2.	Exploración Geotécnica .....	57
7.2.1.	Calicatas Ejecutadas .....	57
7.2.2.	Ensayos de Penetración Ligera .....	58
7.2.3.	Ensayos de Densidad del Campo por el Método del Cono de Arena....	59
7.3.	Ensayos de Laboratorio .....	59
7.3.1.	Ensayos de Mecánica de Suelos .....	60
7.3.2.	Análisis Basado en Ensayo Químico .....	60
7.4.	Perfiles Estratigráficos .....	60
7.5.	Agresión Química al Concreto de la Cimentación.....	61
7.6.	Recopilación de Información Geofísica.....	62
7.7.	Exploración Geofísica .....	63
7.7.1.	Ensayo de Medición Puntual de Microtremores .....	63
7.7.2.	Resultados de los Periodos Naturales de Vibración Observados .....	67
7.7.3.	Ensayo de Análisis Multicanal de Ondas superficiales (MASW) .....	68
7.7.4.	Resultados de Perfiles de Velocidad de Ondas de Corte (Ensayo MASW).....	70
7.7.5.	Ensayo de Medición de Arreglo de Microtremores.....	76
7.7.6.	Resultados de Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte (Ensayo de Arreglos de Microtremores) .....	79
7.7.7.	Ensayo de Refracción Sísmica.....	80
7.7.8.	Resultados de Perfiles de Velocidad de Onda de Compresión (Ensayo de Refracción Sísmica).....	81
<b>8.</b>	<b>MAPAS.....</b>	<b>85</b>
8.1.	Tipos de Suelo .....	85
8.2.	Microzonificación Geotécnica .....	89
8.3.	Zonas de Isoperiodos .....	91
8.4.	Peligros Relacionados a Eventos Naturales (Peligros Geológicos) .....	91
8.4.1.	Peligros Geológicos.....	92
8.4.2.	Mapa de Peligros Geológicos .....	92

## REFERENCIAS

## TOMO II

### ESTUDIOS DE DIAGNÓSTICO DEL RIESGO DISTRITO DE CIENEGUILLA

#### MAPAS

Ubicación del Proyecto II-1

#### Anexo A

A.1. Descripción de planes de vuelo Fotogramétricos

A.2. Panel Fotográfico de Geología

A.3. Mapas de Geomática

- Zonas de levantamiento fotogramétrico A.3 – 1
- Ortomosaico Zona 01 A.3 – 2.1
- Ortomosaico Zona 02 A.3 – 2.2
- Ortomosaico Zona 03 A.3 – 2.3
- Ortomosaico Zona 04 A.3 – 2.4
- Ortomosaico Zona 05 A.3 – 2.5
- Ortomosaico Zona 06 A.3 – 2.6
- Ortomosaico Zona 07 A.3 – 2.7
- Ortomosaico Zona 08 A.3 – 2.8
- Ortomosaico Zona 09 A.3 – 2.9
- Ortomosaico Zona 10 A.3 – 2.10
- Ortomosaico Zona 11 A.3 – 2.11
- Ortomosaico Zona 12 A.3 – 2.12
- Ortomosaico Zona 13 A.3 – 2.13
- Ortomosaico Zona 01 A.3 – 2.1
- Modelo Digital de Superficie Zona 01 A.3 – 3.1
- Modelo Digital de Superficie Zona 02 A.3 – 3.2
- Modelo Digital de Superficie Zona 03 A.3 – 3.3
- Modelo Digital de Superficie Zona 04 A.3 – 3.4
- Modelo Digital de Superficie Zona 05 A.3 – 3.5
- Modelo Digital de Superficie Zona 06 A.3 – 3.6
- Modelo Digital de Superficie Zona 07 A.3 – 3.7
- Modelo Digital de Superficie Zona 08 A.3 – 3.8
- Modelo Digital de Superficie Zona 09 A.3 – 3.9
- Modelo Digital de Superficie Zona 10 A.3 – 3.10
- Modelo Digital de Superficie Zona 11 A.3 – 3.11
- Modelo Digital de Superficie Zona 12 A.3 – 3.12
- Modelo Digital de Superficie Zona 13 A.3 – 3.13
- Modelo Digital de Superficie Cieneguilla A.3 – 4

A.4. Mapas de Geología

- Geológico Regional A.4 – 1
- Geológico Local A.4 – 2
- Geomorfología A.4 – 3

## Anexo B

### B.1. Relación de Sismos Históricos

### B.2. Isosistas Disponibles

### B.3. Mapas

- Fuentes Sismogénicas de Subducción B.3 - 1
- Fuentes Sismogénicas Continentales B.3 - 2
- Densidades Sísmicas B.3 - 3
- Distribución de Epicentros B.3 - 4
- Neotectónica Regional B.3 - 5
- Sección Transversal de la Zona de Estudio B.3 – 6

## Anexo C

### C.1. Tablas de Exploración Geotécnica

- Tabla 1: Relación de Calicatas Recopiladas
- Tabla 2: Relación de Calicatas Ejecutadas
- Tabla 3: Relación de Ensayos de Penetración Dinámica Ligera Propuestos
- Tabla 4: Resultados de Ensayos Estándar para la Densidad y Peso Unitario del Suelo In Situ mediante el Método del Cono de Arena.
- Tabla 5: Resultados de Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos
- Tabla 6: Resultados de Ensayos de Compresión Triaxial CD
- Tabla 7: Resultados de Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos
- Tabla 8: Resultados de Ensayos Químicos
- Tabla 9: Resultados de Ensayos Químicos Nocivos para la Cimentación

### C.2: Registros de Sondajes Recopilados

### C.3: Registros de Sondajes Ejecutados

### C.4: Panel Fotográfico de Exploración Geotécnica

### C.5: Certificados de Ensayos de Laboratorio

### C.6: Perfil Estratigráfico

### C.7. Tablas de Exploración Geofísica

- Tabla 1: Ubicación de los Puntos de Microtremores Recopilados y sus Valores de Período
- Tabla 2: Ubicación de lo Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Recopilados - Ensayos MASW
- Tabla 3: Resumen de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Recopilados – Ensayos MASW
- Tabla 4: Ubicación de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Compresión Recopilados – Ensayos de Refracción Sísmica
- Tabla 5: Resumen de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Compresión Recopilados – Ensayos de Refracción Sísmica
- Tabla 6: Ubicación de las Mediciones Puntuales de Microtremores Ejecutadas y sus Valores de Período
- Tabla 7: Ubicación de las Líneas Sísmicas Ejecutadas - Ensayos MASW

- Tabla 8: Resumen de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Ejecutados - Ensayo MASW
- Tabla 9: Ubicación de los Arreglos de Microtremores Ejecutados
- Tabla 10: Resumen de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Ejecutados – Ensayo de Arreglos de Microtremores
- Tabla 11: Ubicación de las Líneas Sísmicas Ejecutadas – Ensayo de Refracción Sísmica
- Tabla 12: Resumen de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Compresión – Ensayo de Refracción Sísmica

C.8. Registro de las Mediciones Puntuales de Microtremores Recopiladas

C.9. Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Recopilados – Ensayos MASW

C.10. Perfiles de Velocidades de Ondas de Compresión Recopilados – Ensayos de Refracción Sísmica

C.11. Registros de las Mediciones Puntuales de Microtremores Ejecutados

C.12. Registros de Ondas Sísmicas Ejecutadas - Ensayo MASW

C.13. Curvas de Dispersión Ejecutadas - Ensayo MASW

C.14. Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Ejecutados - Ensayo MASW

C.15. Registros de Ondas Sísmicas Ejecutadas - Ensayo de Arreglo de Microtremores

C.16. Curva de Dispersión Ejecutada - Ensayo de Arreglo de Microtremores

C.17. Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Ejecutados - Ensayo de Arreglo de Microtremores

C.18. Verificación de los Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte Ejecutados - Ensayo de Arreglo de Microtremores

C.19. Registros de Ondas Sísmicas Ejecutados - Ensayo de Refracción Sísmica

C.20. Dromocrónicas Ejecutadas - Ensayo de Refracción Sísmica

C.21. Perfiles de Velocidades de Ondas de Compresión Ejecutados - Ensayo de Refracción Sísmica

C.22. Panel Fotográfico de la Exploración Geofísica

C.23. Mapas

- Ubicación de Sondajes Ejecutados y Recopilados C.23 - 1
- Ubicación de Puntos de Microtremores Recopilados y Ejecutados C.23 - 2
- Ubicación de Perfiles Sísmicos Recopilados y Ejecutados C.23 - 3

## PRODUCTO 02 – TOMO II DIAGNÓSTICO DEL RIESGO

### 1. INTRODUCCIÓN

Con fecha 23 de febrero de 2010, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Marco de Cooperación Interinstitucional con la finalidad de promover acciones de mutua colaboración, referido a brindar cooperación técnica en materia de estudios, elaboración, supervisión, ejecución y evaluación de proyectos y obras de ingeniería y arquitectura, así como la prestación de servicios compatibles a ambas entidades.

En fecha 15 de abril de 2010, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Específico, cuya finalidad fue prestar apoyo para la realización del **Estudio de Microzonificación Sísmica y de Vulnerabilidad para la ciudad de Lima**, el objetivo fue analizar el riesgo de la ciudad de Lima y Callao, con énfasis en seis distritos representativos de la zona urbana: San Juan de Lurigancho, Villa El Salvador, Puente Piedra, Chorrillos, La Molina y Comas. Este estudio fue ejecutado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería que dio como resultado una valiosa información referente al cálculo del costo de reparación y reposición de viviendas e infraestructura de saneamiento.

En fecha 22 de julio de 2011, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Específico, cuya finalidad fue el **Estudio de Estimación de Costos de Reparación y Reposición de Vivienda e Infraestructura de Saneamiento frente a un evento sísmico severo en algunas ciudades del País**. Este estudio fue ejecutado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y se obtuvo como resultado una herramienta para el cómputo de Costos de Reparación y Reposición de Vivienda e Infraestructura de Saneamiento, para ser utilizado en ciudades intermedias, cuyo diagnóstico es dependiente de la calidad de información suministrada al modelo.

En fecha 19 de diciembre de 2011, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Específico, con la finalidad de iniciar el desarrollo de información, en aquellas zonas que habían sufrido mayor afectación como consecuencia de los sismos del 15 de agosto de 2007. En ese sentido, el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería realizó el **“Estudio de Microzonificación Sísmica para el ámbito Pisco, San Clemente, Túpac Amaru, San Andrés y Paracas”** Este estudio dio como resultado información referente al cálculo del costo



PERÚ

Ministerio  
de Vivienda, Construcción  
y Saneamiento

Viceministerio de  
Vivienda y Urbanismo

Programa Nuestras  
Ciudades



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES  
SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES



de reparación y reposición de viviendas e infraestructura de saneamiento en los distritos en estudio.

Con fecha 03 de agosto de 2012, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Específico, con la finalidad de iniciar el **“Estudio de Microzonificación Sísmica, Mapas de Peligros Múltiples y Análisis de Riesgo de los distritos del Cercado de Lima, Ventanilla y de las ciudades de Chincha y Contumazá”**. Este estudio fue ejecutado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y proporcionó como resultados mapas de microzonificación sísmica, mapas de peligros naturales y de riesgo sísmico de las zonas de estudio, siendo estos mapas de gran utilidad para el desarrollo urbano de estas localidades.

Con fecha 09 de setiembre de 2013, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un Convenio Específico, con la finalidad de iniciar los **“Estudios de Microzonificación Geotécnica Sísmica y Evaluación del Riesgo en Zonas Ubicadas en los Distritos de Carabaylo y el Agustino (Provincia y Departamento de Lima); distrito del Cusco (provincia y departamento del Cusco); y distrito de Alto Selva Alegre (Provincia y Departamento de Arequipa)”**. Este estudio fue ejecutado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y dio como resultados mapas de microzonificación sísmica, mapas de peligros naturales y de riesgo sísmico de las zonas de estudio, siendo estos mapas de gran utilidad para el desarrollo urbano de estas localidades.

Con fecha 25 de agosto de 2015, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de iniciar los **“Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en las Zonas Ubicadas en los Distritos de: San Juan de Miraflores, Santa Rosa, San Miguel (Provincia y Departamento de Lima); Carmen de la Legua-Reynoso (Provincia Constitucional del Callao)”**. La ejecución de estos estudios fue responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y dio como resultados mapas de microzonificación sísmica, mapas de peligros naturales y de riesgo sísmico de las zonas de estudio, siendo estos mapas de gran utilidad para el desarrollo urbano de estas localidades.

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, a través del Programa Nuestras Ciudades del Viceministerio de Vivienda y Urbanismo, se encarga de la gestión del riesgo de desastres en zonas urbanas, a través del diseño de un sistema de gestión integral de riesgo de desastres naturales que comprenda las acciones de prevención y mitigación. Actualmente tiene una gran preocupación debido a que según estudios realizados por distintas instituciones nacionales e internacionales, el

principal riesgo que enfrenta el país es el sísmico. El escenario catastrófico prominente para el país sería un eventual sismo que afectará ciudades ubicadas sobre el Pacífico. Además del impacto sobre la población, tanto la infraestructura de servicios públicos como las viviendas serían los sectores más afectados y que generarían las mayores pérdidas económicas demandando sustanciales recursos financieros para la posterior rehabilitación y reconstrucción.

Con fecha 26 de julio de 2016, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de iniciar los **“Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en las Áreas Urbanas de las Municipalidades Distritales de Santiago de Surco, Santa Anita (Provincia y Departamento de Lima), La Perla (Provincia Constitucional del Callao) y Municipalidad Provincial de Jaén (Departamento de Cajamarca)**. La ejecución de estos estudios es de responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Con fecha 29 de agosto de 2017, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de iniciar los **“Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en Zonas de Estudios Ubicadas en las Áreas Urbanas de las Municipalidades Distritales de Surquillo, San Bartolo (Provincia y Departamento de Lima), Bellavista (Provincia Constitucional del Callao) y Municipalidad Distrital de El Porvenir (Departamento de La Libertad)**. La ejecución de estos estudios es de responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Con fecha 05 de julio de 2018, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de realizar los **“Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en Zonas de Estudios Ubicadas en Áreas de las Municipalidades Distritales de Catacaos (Piura) y Lambayeque (Lambayeque)”**. La ejecución de estos estudios fue de responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Con fecha 07 de agosto de 2018, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de iniciar los **“Estudios de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en las Zonas de Estudios Ubicadas en las Áreas Urbanas de las Municipalidades Distritales de Pueblo Libre y La Victoria (Provincia y Departamento de Lima), Trujillo y Víctor Larco Herrera (Provincia de Trujillo y Departamento de La Libertad)”**. La ejecución de

estos estudios es de responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Con fecha 04 de noviembre de 2018, el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento y la Universidad Nacional de Ingeniería, suscribieron un convenio de colaboración interinstitucional, con la finalidad de iniciar el **“Estudio de Microzonificación Sísmica y Análisis de Riesgo en las Zonas de Estudios Ubicadas en las Áreas Urbanas de la Municipalidad Distrital de Cieneguilla”**. La ejecución de estos estudios es de responsabilidad del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El presente informe incluye información concerniente a la recopilación de datos, metodología y ensayos geotécnicos y geofísicos propuestos para el Estudio de Diagnóstico del Riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Cieneguilla (Provincia y Departamento de Lima).

## 2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

El objetivo del estudio es el diagnóstico del Riesgo en el distrito de Cieneguilla (Provincia y Departamento de Lima), para ello es necesario el desarrollo de Mapas de Tipos de Suelos, Microzonificación Geotécnica, Isoperíodos y Peligros de Origen Natural de la zona de estudio ubicada en el distrito de Cieneguilla, a través del análisis de las condiciones geológicas, la sismicidad de la zona, y estudios de mecánica y dinámica de suelos. Será necesario desarrollar como objetivos complementarios lo siguiente:

- Descripción de las condiciones regionales y locales de la geología de la zona de estudio.
- Estudio de peligro sísmico, mediante métodos de análisis probabilísticos con la finalidad de estimar la máxima aceleración del suelo a presentarse en la zona de estudio.
- Ejecución de ensayos de exploración del suelo (calicatas) que permitan conocer las características del suelo de la zona de estudio hasta una profundidad aproximada de tres metros.
- Realización de ensayos de laboratorio para determinar las características físicas y mecánicas de los suelos que conforman el perfil estratigráfico del terreno.
- Aplicación de ensayos geofísicos denominados Análisis de Ondas Superficiales en Arreglos Multicanales (MASW), y ensayo de Arreglo de Microtremores (método SPAC o F-K), que permiten determinar las características del suelo hasta aproximadamente los 25 metros.
- Realización de ensayos geofísicos denominados Microtremores (Vibración Ambiental) que permite estimar el periodo de oscilación lateral del suelo.

### 3. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El distrito de Cieneguilla se ubica en la Provincia de Lima y limita con los siguientes distritos:

- Por el norte con los distritos de Ate y Chaclacayo.
- Por el oeste y sur con el distrito de Pachacámac.
- Por el este con la provincia de Huarochirí.

El área de estudio para este distrito es de 3897.86 Ha y se encuentra definido en el Mapa II-1, el cual fue elaborado a partir de la información adquirida del Instituto Metropolitano de Planificación: Mapa de Zonificación de Cieneguilla e información catastral de la propia municipalidad del distrito.

### 4. INFORMACIÓN RECOPIADA

A continuación, se presenta la recopilación de información relacionada con el objetivo del estudio, la cual ha sido utilizada para el desarrollo del presente informe.

#### 4.1. Estudios Geológicos y Geotécnicos

Para los estudios geológicos se tomó como referencia el Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica 25-i, 25-j. 24-i, 24-j - [Boletín A 43], editados por el INGEMMET (1992). La información relevante para el distrito de Cieneguilla fue extraída y utilizada en la elaboración de la descripción geológica y peligros relacionados a eventos naturales, del presente informe, tomo II.

Para los estudios geotécnicos se ha recopilado información generada en el “Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico del distrito de Pachacamac” realizado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la FIC-UNI en el año 2018, por encargo del Ministerio de Economía y Finanzas seleccionando sondeos que se encuentran dentro del área en estudio. También se recopiló información geotécnica proveniente de diversos proyectos realizados por la empresa privada Corporación Olam S.A.C, de estos, el estudio denominado “Anteproyecto de Obras Generales y Secundarias de Agua Portable y Alcantarillado de Tambo Viejo y Anexos”, ha sido el que ha aportado la mayor cantidad información para el presente trabajo.

En el caso de la información geofísica, se han recopilado datos correspondientes a mediciones puntuales de microtemores y perfiles de velocidades de ondas de corte y compresión ejecutados durante el Estudio de Microzonificación Sísmica del Distrito de Pachacámac ejecutado por el CISMID, en el marco del programa presupuestal 0068 Reducción de Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres del Ministerio de Economía y Finanzas.

## 4.2. Datos Catastrales

La información base para el análisis de la vulnerabilidad de las edificaciones en el distrito de Cieneguilla, está contenido en una base de datos geoespacial que fue adquirida por CISMID del Instituto Nacional de Estadística e Informática en formato SHP y corregida con las visitas de campo e imágenes satelitales de la zona. Esta base de datos contiene un total de 1482 registros, que equivalen al número de manzanas totales de la zona en evaluación. La información geográfica contenida está proyectada en el sistema geográfico Universal Transversal de Mercator – UTM, Zona 18 Sur, para que sea integrada con otras capas de información, como las vías y sobre todo con la información relacionada con la microzonificación sísmica. Con esta base de datos se realizaron los trabajos de levantamiento de información de campo

## 4.3. Red de Agua

Para el caso de estudio del distrito de Cieneguilla, se pudo obtener información de la red de agua con un total de 660 registros, donde el material de las tuberías se distribuye en PVC, Asbesto Cemento y Hierro Dúctil, donde aparece como atributos el diámetro de la tubería, material y su longitud. La base de datos gráfica se encuentra proyectada en el sistema de coordenadas WGS-84 UTM Zona 18 Sur. Esta información se compatibiliza con los datos de microzonificación para el análisis preliminar de los daños en las tuberías bajo un evento sísmico. Adicionalmente y posterior al mapa de microzonificación sísmica, a esta base de datos se le añade la información de velocidad probable del suelo, obtenida de los estudios geotécnicos y geofísicos para finalmente desarrollar y evaluar los daños en las tuberías. Los daños en las tuberías se muestran en roturas por kilómetro de tubería, para cada tipo de éstas, utilizando curvas de fragilidad desarrolladas por investigadores japoneses.

## 5. MARCO GEOLÓGICO

El distrito de Cieneguilla se localiza al sur este de la ciudad de Lima, es un distrito ribereño al río Lurín. Para complementar los estudios geológicos correspondientes al distrito se realizó un levantamiento fotogramétrico que ayuden a describir las características geológicas en su contexto regional y local.

### 5.1. Levantamiento Fotogramétrico y refinamiento de Modelo digital de Superficie

#### 5.1.1. Levantamiento Fotogramétrico

##### 5.1.1.1. Objetivo

Los trabajos de campo realizados por la especialidad de Geomática en el distrito de Cieneguilla, tienen por objetivo adquirir información geoespacial del lugar mediante técnicas fotogramétricas y de esta forma generar información topográfica actualizada, así como visualizar y registrar el estado de las viviendas en las laderas de los cerros mediante fotos panorámicas tomadas a gran altura, la cual servirá para las diferentes disciplinas que realizarán estudios en la zona.

### 5.1.1.2. Equipos utilizados en campo

La Tabla 5.1.1.1 muestra el equipamiento utilizado por el equipo técnico de Geomática para realizar los diversos trabajos durante el levantamiento fotogramétrico. Estos equipos también pueden apreciarse en la Figura 5.1.1.1. El equipo utilizado para la adquisición de imágenes se denomina Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés), el cual es un vehículo aéreo no tripulado (comúnmente llamado dron). Para el presente estudio se utilizó un RPAS multirrotor de tipo cuadricóptero (cuatro rotores) de marca DJI, modelo Phantom 4 el cual posee una cámara fotográfica de 12.4 MP y un control remoto con soporte para dispositivo móvil, también se contó con un juego de 6 baterías para el RPAS y un iPad de 9.7” para la elaboración de los planes de vuelo mediante una aplicación compatible con la aeronave.

**Tabla 5.1.1.1.** Relación de equipos utilizados para el trabajo de campo

<b>EQUIPOS</b>	<b>MARCA</b>
RPAS Phantom 3 Professional	DJI
RPAS Phantom 4	DJI
IPad MP1J2CL/A	Apple
Laptop para registro de información en campo	Toshiba
Baterías portátiles	DJI
Conos de seguridad	- -



**Figura 5.1.1** Equipos utilizados durante el levantamiento fotogramétrico

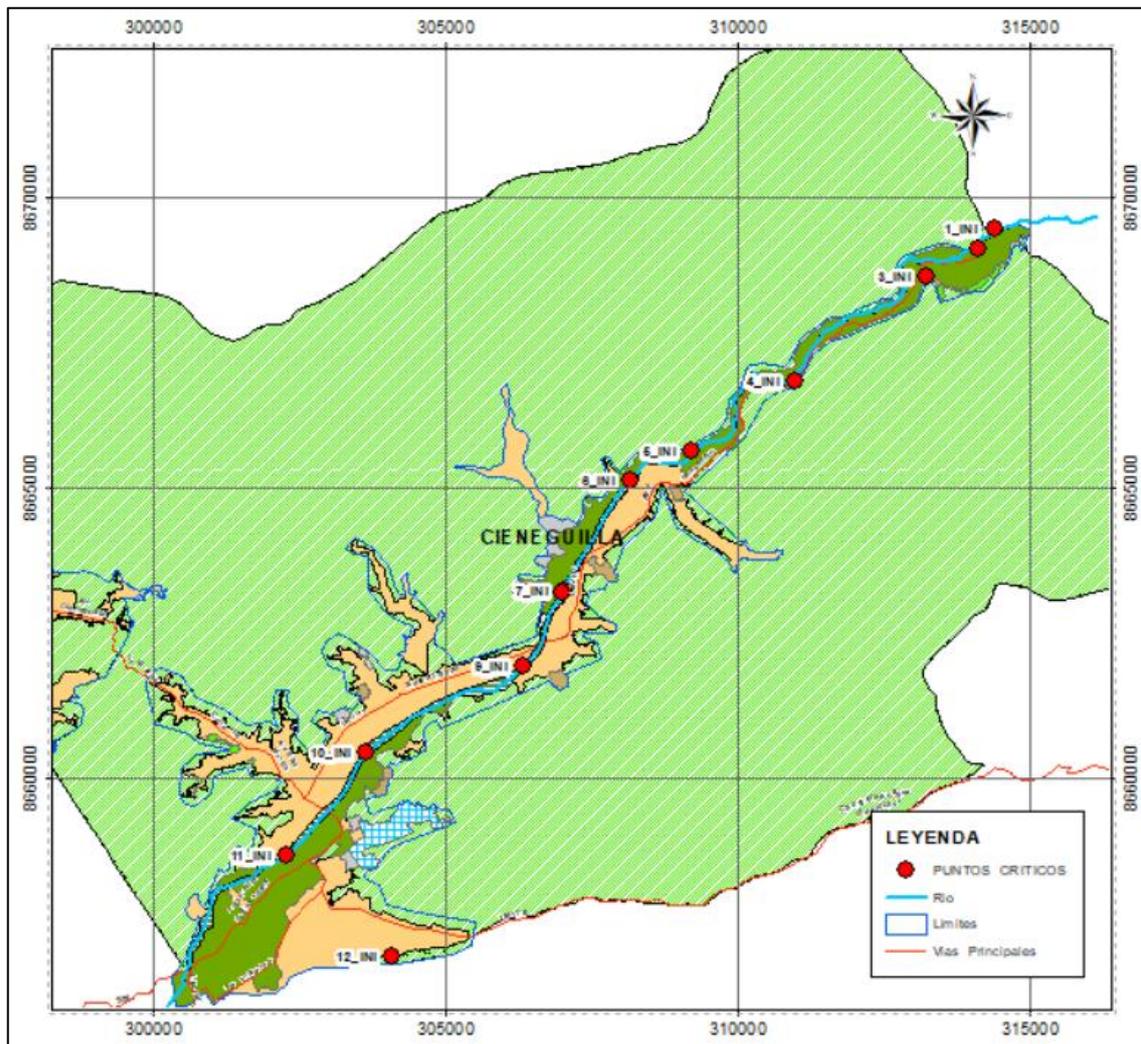
### 5.1.1.3. Zonas de alto riesgo a inundaciones en el distrito de Cieneguilla

Estudios de la Autoridad Nacional del Agua, determinaron puntos críticos referentes a las zonas de alto riesgo de los distritos de la provincia y departamento de Lima frente a inundaciones. Para el presente estudio se identificaron las zonas que están en el cauce del río Lurín, dentro del distrito de Cieneguilla (Ver Tabla 5.1.1.2.). Las localidades en riesgo fueron georreferenciadas y se muestran en la Figura 5.1.1.2.

**Tabla 5.1.1.2.** Ubicación de las zonas de alto riesgo por inundaciones (Sistema de coordenadas WGS84 / UTM zona 18S)

N°	LOCALIDAD	INICIO		FIN	
		ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
1	Puente Chontay	314384	8669461	314133	8669281
2	Chontay	314122	8669113	313143	8668920
3	Quebrada Sierra Morena	313223	8668648	313466	8668098
4	El Cañaverl	310974	8666854	310683	8666869
5	CPR Río Seco, Caricillo	309203	8665647	308301	8665279
6	Molle Alto, Molino Verde, El Edén, San Francisco	308159	8665129	307724	8664570
7	Irqueño, Huaycán, Mesa de Piedra, Puente Ranchito	307023	8663244	307671	8664437
8	Malecón Lurín Sarapampa, Puente Panquilla, Av D con Calle 20, ingreso sauce Alto	306991	8663203	306442	8662044
9	Malecón Lurín, Calle 1	306335	8661953	304296	8660946
10	Malecón Lurín, Puente Algodona, Puente Inca Molla	303658	8660452	302675	8659089
11	Puente Libertad, Condominio Río de Sol, Vivero Municipal, Av Nuevo Toledo	302299	8658699	300591	8656684
12	Quebrada Pampa Tinajas	304088	8656939	302119	8656980

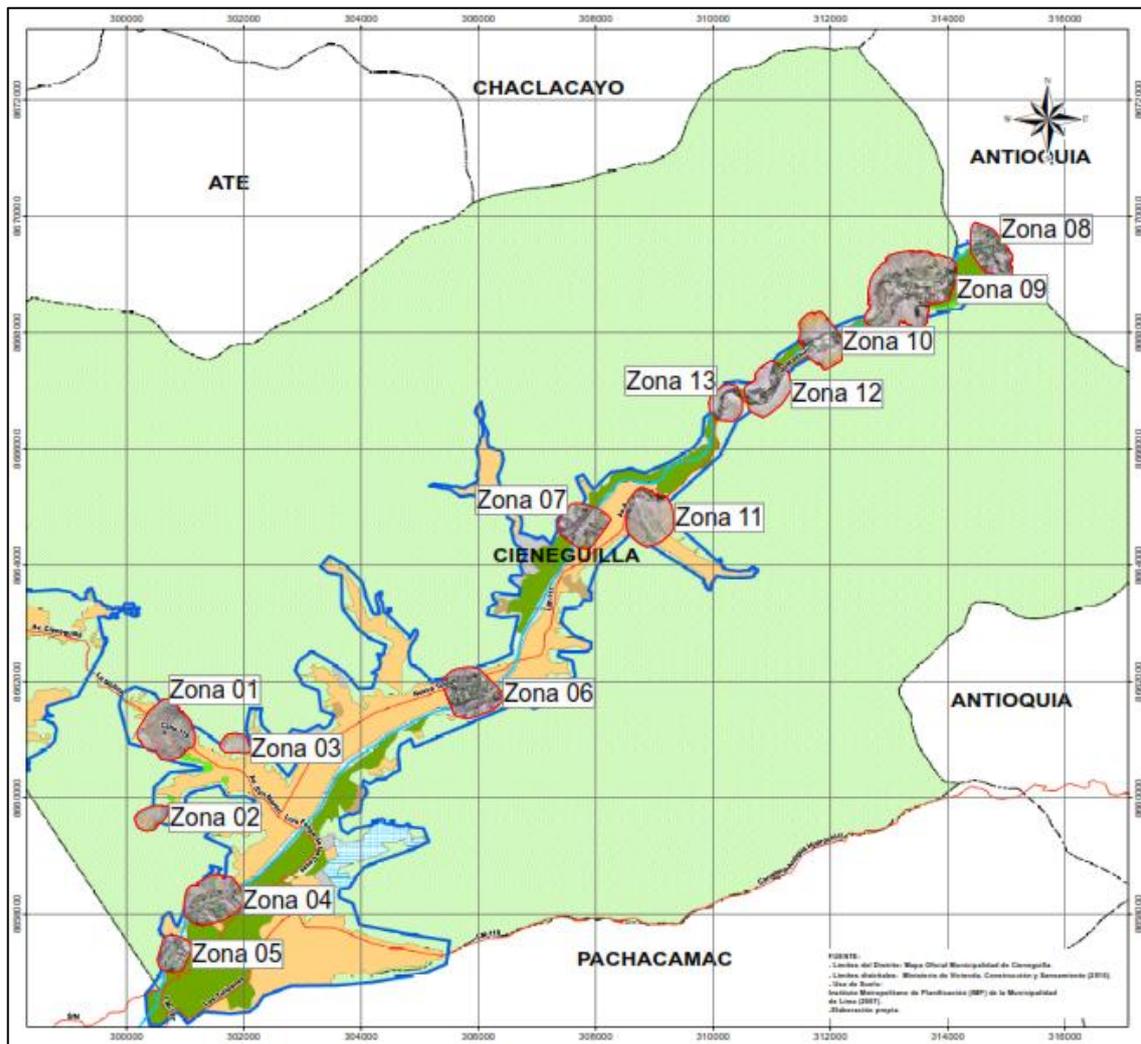
Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)



**Figura 5.1.1.2.** Mapa de la ubicación de las zonas de alto riesgo por inundaciones

#### 5.1.1.4. Reconocimiento de campo

El trabajo consiste en realizar exploraciones de reconocimiento de campo, donde el equipo técnico del Departamento de Geomática de CISMID recorre la zona de estudio con la finalidad de determinar la colocación de probables puntos de fotocontrol tomando en cuenta su visibilidad desde el aire y estar libre de obstáculos o cableado eléctrico para la adquisición de la información geodésica y además determinar ubicaciones estratégicas para el inicio de las operaciones de vuelo con el sistema aéreo pilotado remotamente (RPAS), tomando en cuenta la altura de los árboles, edificaciones, antenas de telecomunicaciones o la existencia de otros obstáculos para el RPAS dentro de la zona de estudio y áreas colindantes. Se trabajó en trece zonas de vuelo (ver Figura 5.1.1.3.) catalogadas por estudios anteriores de peligros geológicos, en especial los hechos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Instituto Geológico, Metalúrgico y Minero (INGEMMET).



**Figura 5.1.1.3.** Zonas de vuelo fotogramétrico en el distrito de Cieneguilla

#### 5.1.1.5. Adquisición de imágenes aéreas

La adquisición de datos aéreos se realizó mediante un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS, por sus siglas en inglés). En primer lugar, se desarrollaron los planes de vuelo necesarios para cubrir toda el área de estudio, los cuales vienen a ser las trayectorias por las cuales se desplazará la aeronave. Una vez que esta ha despegado, debido a que posee un sistema de navegación por satélite se trasladará a las diversas posiciones donde se ha calculado que capturará las imágenes aéreas, en función a las líneas de vuelo, altura de vuelo y solapamiento de fotos (características que han sido configuradas en el plan de vuelo). Posteriormente se procesan estas imágenes, generando un modelo digital del terreno y una ortofoto actualizada de la zona de estudio correctamente georreferenciadas. La elaboración de los planes de vuelo se ha llevado a cabo con una aplicación móvil usada en sistema operativo iOS. En la Figura 5.1.1.4. se puede apreciar el plan de vuelo programado para que el RPAS pueda cubrir parte del área de estudio. En la Tabla 5.1.1.3. se

aprecia algunos parámetros del total de planes de vuelo realizados como la cantidad de imágenes que se tomaron, la altura de vuelo, la resolución de las fotografías, el área cubierta, entre otros.

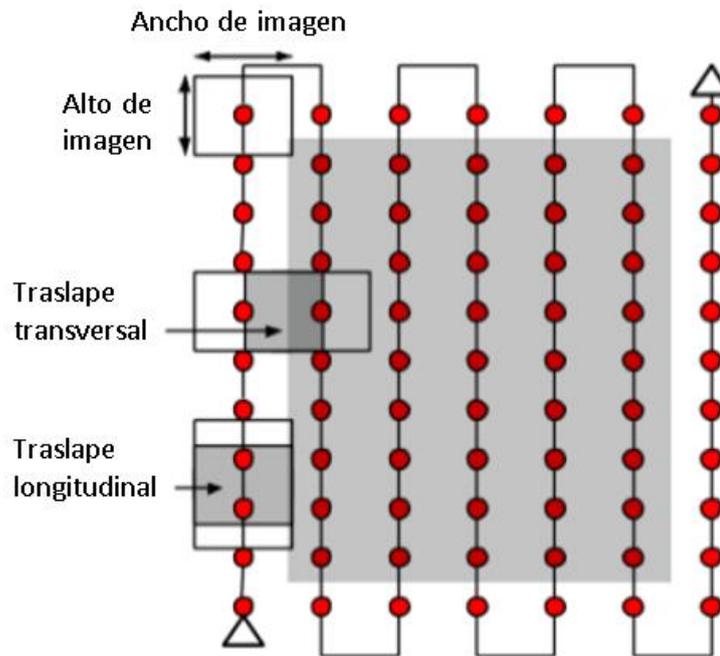


**Figura 5.1.1.4.** Plan de vuelo programado dentro de la zona de estudio

**Tabla 5.1.1.3.** Propiedades de los planes de vuelo realizados y el detalle de los parámetros más importantes que lo caracterizan.

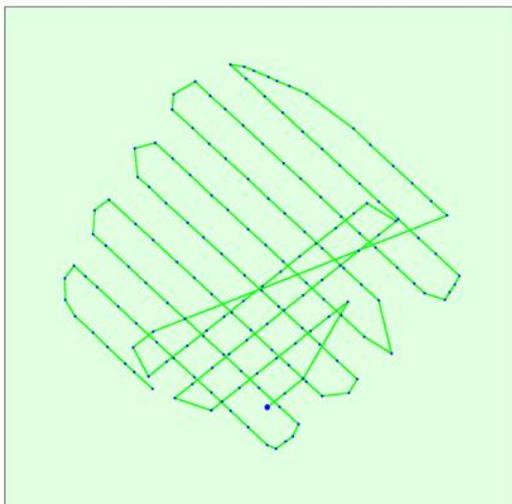
	CARACTERÍSTICA	CANTIDAD
1	Zonas levantadas	13
2	Área cubierta total	711.72 hectáreas
3	Velocidad de vuelo promedio	9 m/s
4	Número de imágenes calibradas	1328
5	Altura de vuelo programada	150 m
6	Resolución obtenida	7.28 – 9.10 cm/pixel

Los traslapes longitudinales como también los traslapes transversales en las tomas aéreas fueron ajustados al 80% en ambos casos (ver Figura 5.1.1.5.). De esta forma se obtiene un mejor detalle en el procesamiento y se evita el sobrevuelo en caso de que falte alguna imagen en algún tramo del plan de vuelo.

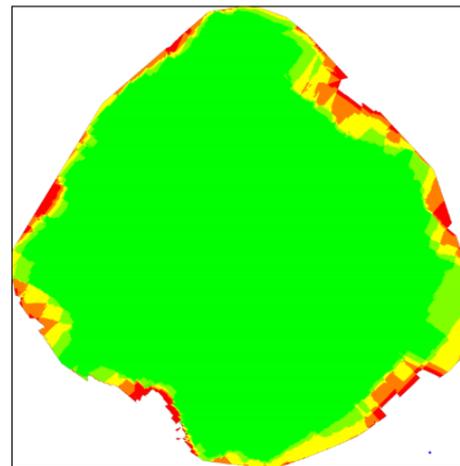


**Figura 5.1.1.5.** Diagrama de plan de vuelo y la distribución de las imágenes para un traslape de 80% transversal y longitudinal. (Fuente manual Pix4D)

En la Figura 5.1.1.6. se puede observar la posición (en color verde) de cada fotografía tomada por el RPAS y el área de interés analizada para la obtención de la topografía y la ortofoto. Los puntos azules son la posición corregida de las imágenes, mientras que los puntos rojos corresponden a imágenes capturadas que no fueron tomadas en cuenta para el análisis del presente estudio.



**Figura 5.1.6.** Ubicación en planta de las fotografías tomadas por el RPAS, perteneciente a la Zona 06



NÚMERO DE IMÁGENES TRASLAPADAS EN CADA PIXEL DEL ORTOMOSAICO: 1 2 3 4 5+

**Figura 5.1.7.** Diagrama de traslape entre las fotografías obtenidas de la Zona 06

Por otro lado, el diagrama de la Figura 5.1.1.7. se muestra cual es la cantidad de fotos que se han logrado traslapar entre sí. Como era de esperarse, generalmente los bordes de la zona de vuelo son las que aparecen de un color naranja o rojo lo que indica que se han traslapado dos o no existe traslape entre las fotografías de esa parte, respectivamente.

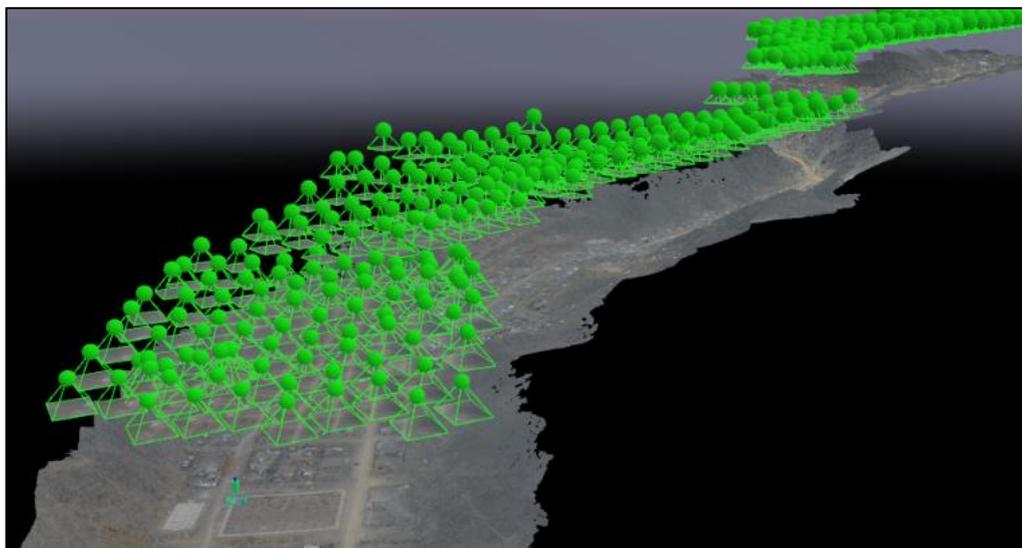
En la Figura 5.1.1.8. se puede apreciar las fotografías georreferenciadas tomadas por el RPAS.

#### 5.1.1.6. Procesamiento fotogramétrico

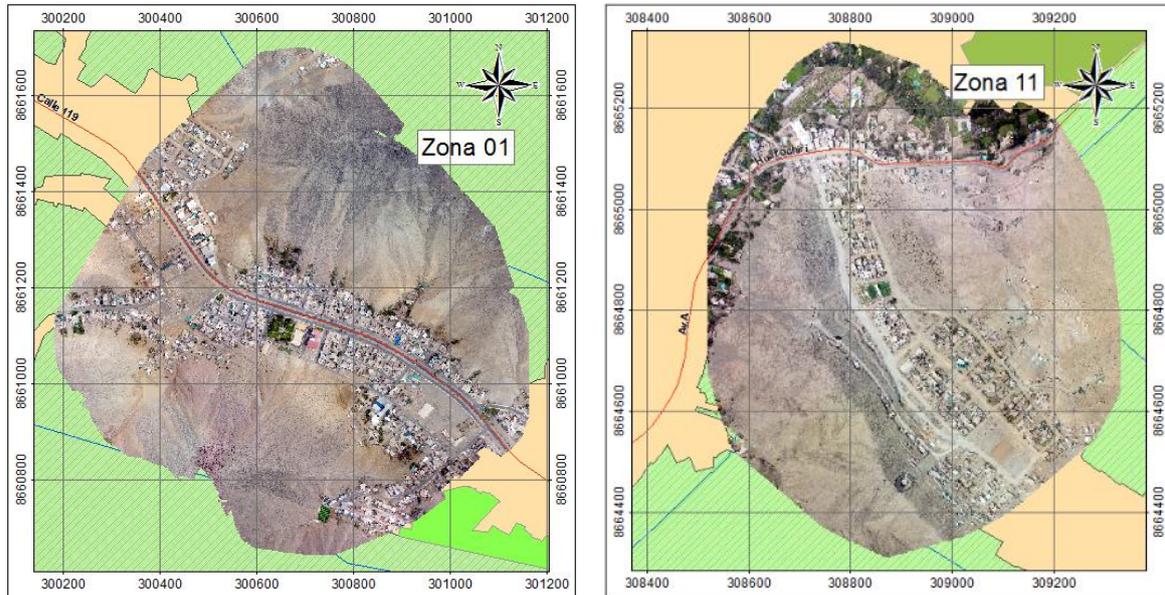
Una vez revisadas y corregidas (de ser necesario) las fotografías aéreas, se procede a obtener la nube de puntos mediante técnicas de restitución fotogramétrica y aerotriangulación utilizando para esta labor un software de procesamiento fotogramétrico, posteriormente se calcula una nube densa de puntos y se obtienen las ortofotos (también llamadas ortomosaicos), mostrados en la Figura 5.1.9. y Figura 5.1.10 respectivamente.

A partir de las imágenes de los RPAS no solo se obtiene el ortomosaico sino también, como se aprecia en la Figura 5.1.10., el modelo digital de superficie (DSM, por sus siglas en inglés) que viene a ser la representación de las elevaciones de cada punto de la superficie levantada, incluyendo al mismo terreno, edificaciones, árboles, entre otros elementos.

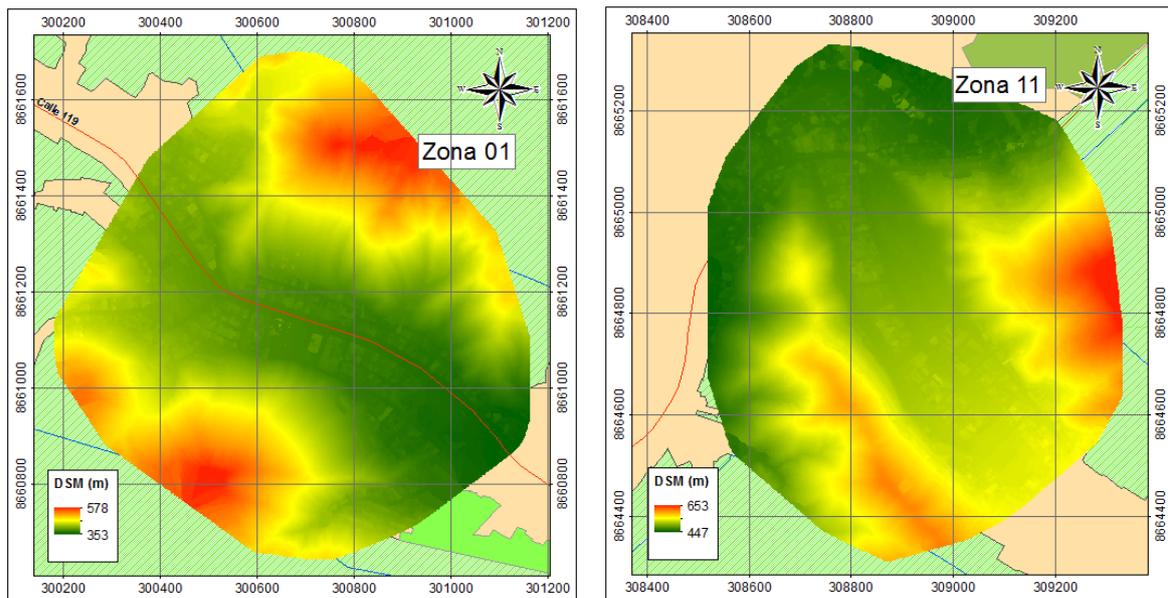
Las ortofotos generadas a partir de la utilización del RPAS, tienen una resolución entre 8.00 a 9.00 cm/píxel, brindando un mayor detalle de todo el contenido actual de la zona de estudio a comparación de una imagen satelital.



**Figura 5.1.8.** Visualización tridimensional en software de procesamiento fotogramétrico del alineamiento de fotografías tomadas por el RPAS y la nube de puntos generada



**Figura 5.1.9.** Ortomosaicos de la Zona 01 y Zona 11 dentro del área de estudio.



**Figura 5.1.10.** Modelos digitales de superficie de la Zona 01 y Zona 11 dentro del área de estudio.

En el Anexo A.1. Descripción de planes de vuelo Fotogramétricos, se puede ver algunas capturas aéreas tomadas con el RPAS para las diferentes zonas de vuelo, también se aprecian las propiedades de cada plan de vuelo. En el Anexo A.3. Mapas de Geomática, se muestran los Ortomosaicos y Modelos Digital de Superficie generados en cada zona levantada mediante fotogrametría.

## 5.1.2. Refinamiento y elaboración de un Modelo Digital de Superficie (MDS)

### 5.1.2.1. Conceptos Previos

**a) Superficie real:** También llamada superficie topográfica, es la forma del relieve terrestre incluyendo sus accidentes geográficos como montañas, valles y otras formas terrestres tanto. Es irregular por lo que no se puede representar de forma matemática.

**b) Geoide:** El geoide es una forma de representar la superficie de la Tierra mediante la medición del campo gravitatorio. Se define el geoide como la superficie equipotencial (superficie en la que todos sus puntos experimentan la misma atracción gravitatoria) equivalente a la del nivel medio del mar en su estado normal de reposo. Debido a las diferentes densidades de los materiales que componen las superficies de nuestro planeta, el geoide es una superficie irregular por lo que una definición matemática sería de gran complejidad. (Ver Figura 5.1.2.1) El geoide se utiliza para establecer la superficie de referencia vertical, siendo la distancia entre la superficie real y el geoide conocida como altura ortométrica (altura sobre el nivel medio del mar).

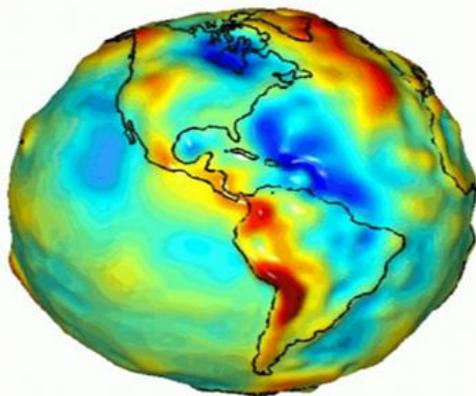


Figura 5.1.2.1. Representación del Geoide

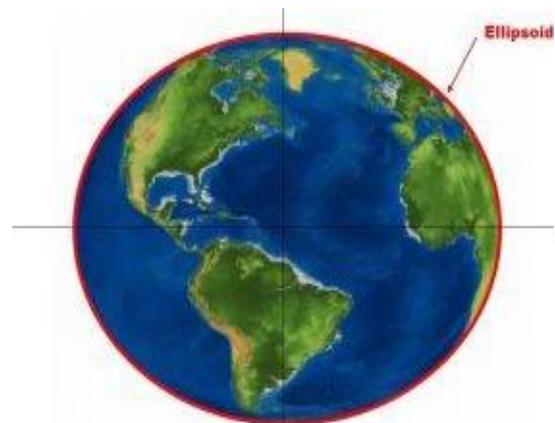


Figura 5.1.2.2. Representación del Elipsoide

**c) Elipsoide de revolución:** Debido a que la forma de la Tierra es ligeramente aplastada en los polos y ensanchada en el Ecuador, la figura matemática que más se aproxima a la forma del Geoide es un elipsoide de revolución. (Ver Figura 5.1.2.2) Sobre esta superficie se definen las coordenadas geodésicas latitud geográfica ( $\varphi$ ) y longitud geográfica ( $\lambda$ ). La altura medida sobre esta superficie es denominada altura elipsoidal. El elipsoide de revolución que mejor se adapte al geoide en la zona con un punto donde ambos coinciden o bien la normal a ambos es la solución adoptada, constituyendo el concepto de Sistema Geodésico de Referencia.

En Perú, usamos oficialmente el elipsoide de revolución WGS84 (World Geodetic System 1984) como Sistema de Referencia Horizontal, el cual es un sistema global y geocéntrico.

### 5.1.2.2. Relación entre superficie real, geoide y elipsoide

- a) **Altura elipsoidal (h):** Es la distancia vertical entre la superficie real y el elipsoide de referencia.
- b) **Altura ortométrica (H):** Es la distancia vertical entre la superficie real y el geoide.
- c) **Ondulación del geoide (N):** Es la distancia vertical entre el geoide y el elipsoide de referencia.

Como se muestra en la Figura 5.1.2.3, se cumple que la altura elipsoidal es igual a la suma de la altura ortométrica y la ondulación del geoide.

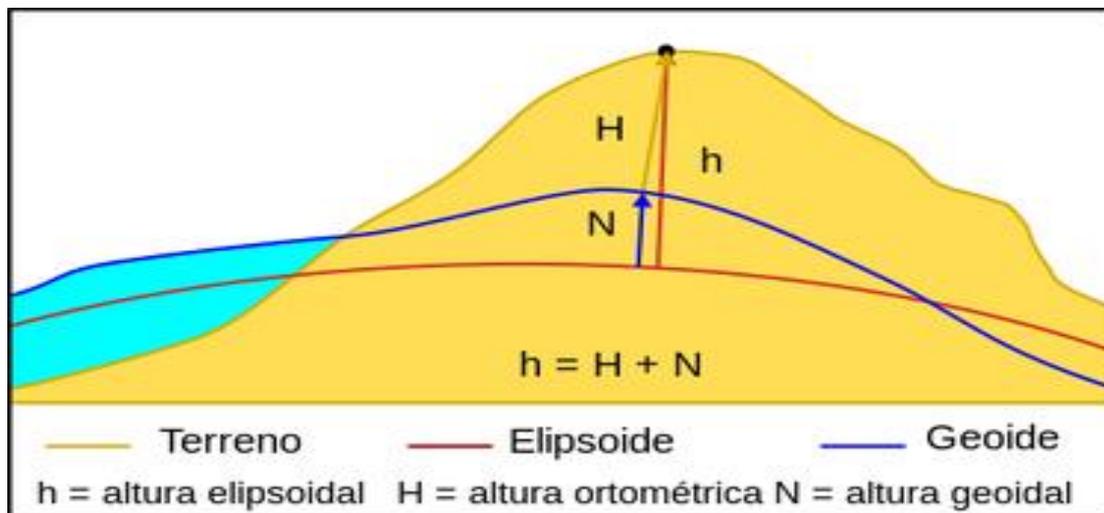


Figura 5.1.2.3 Relación entre Superficie real, Elipsoide y Geoide

### 5.1.2.3. Recopilación de información

#### a) Modelo digital de elevación

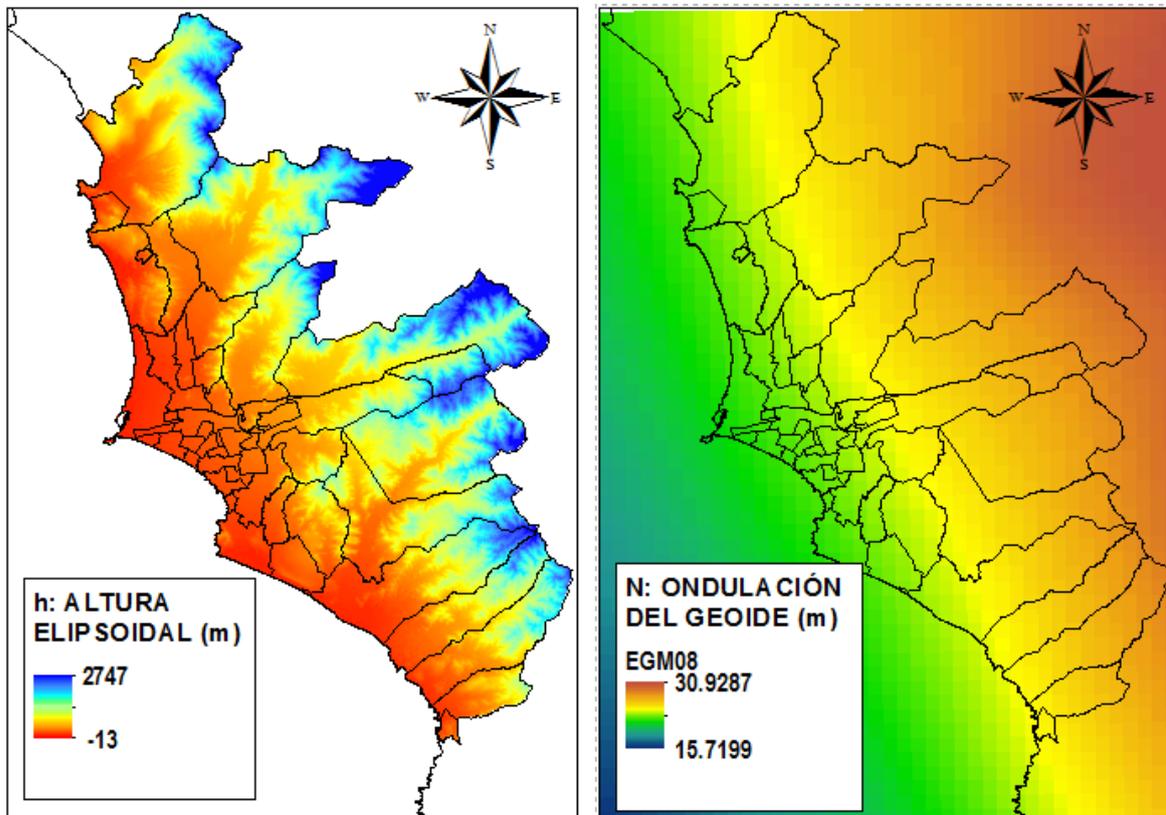
Para la presente investigación se ha utilizado un modelo digital de superficie (MDS) generado por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) en su misión denominada ALOS PALSAR utilizando un radar de apertura sintética (SAR). El área de estudio es la correspondiente al Distrito de Cieneguilla.

El MDS fue descargado de la plataforma web Alaska Satellite Facility, teniendo una resolución espacial de 12.5m/pixel, está referenciado de manera horizontal al sistema WGS84 (World Geodetic System 1984) y nos brinda información de las alturas elipsoidales en el terreno.

## b) Modelo geopotencial

Con el objetivo de obtener un modelo de elevación digital con información de alturas ortométricas y a la ausencia de puntos de control verticales obtenidos mediante métodos de nivelación de precisión, se optó por usar el modelo geopotencial global EGM08. De esta forma, se considera al nivel medio del mar como sistema de referencia vertical.

El modelo geopotencial EGM08 usado tiene una resolución espacial de 1min/píxel (1.85 km/píxel aproximadamente).

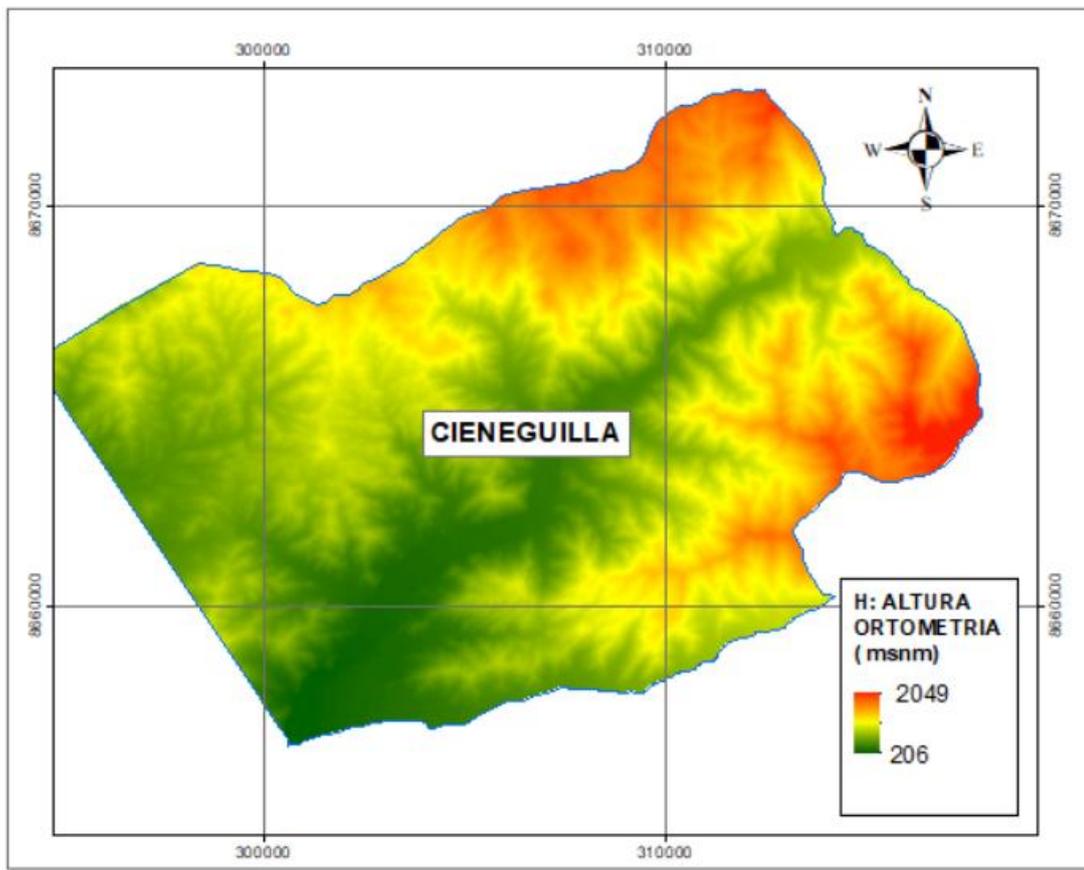


**Figura 5.1.2.4.** MDS de alturas elipsoidales y Modelo geopotencial EGM08 Lima Metropolitana y Callao

### 5.1.2.4. Procesamiento con sistemas de información geográfica (SIG)

Una vez obtenidos el MDS en alturas elipsoidales (**h**) y el modelo geopotencial que nos brinda la ondulación del geoide (**N**), ambos archivos tipo raster en formato TIFF; se procedió a calcular las alturas ortométricas (**H**) mediante el uso de la herramienta Calculadora de raster de una plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG), sabiendo que se cumple la siguiente relación:

$$H = h - N$$



**Figura 5.1.2.5.** MDS de alturas ortométricas (msnm) para la zona de estudio

En el Anexo A.3-4: Modelo Digital de Superficie del distrito de Cieneguilla, se puede visualizar en detalle el procesamiento realizado en esta sección.

## 5.2. Marco Geológico Regional

### 5.2.1. Geología Regional

#### 5.2.1.1. Geomorfología Regional

##### Planicies Costaneras

Es la zona comprendida entre el borde litoral y las estribaciones de la Cordillera Occidental constituida por una faja angosta de territorio paralela a la línea de costa, adquiriendo mayor amplitud en los valles Chancay, Chillón, Rímac (en especial) y Lurín. Constituyen amplias superficies cubiertas por gravas y arenas provenientes del transporte y sedimentación de los ríos Rímac y Lurín y por arena proveniente del acarreo eólico desde las playas, por vientos que corren con dirección SO a NE. Una de estas planicies constituye el cono aluvial del río Lurín, que atraviesa el distrito de Cieneguilla, conformado por gravas, arenas y arcillas formando un potente apilamiento. Esta llanura aluvial se continúa al Sur con el cono aluvial del río Lurín interdigitándose sus depósitos por debajo de la cobertura eólica (al Sur de Villa y San Juan).

### **Conos Deyectivos**

El distrito de Cieneguilla, está conformado por cerros que en sus laderas presentan cárcavas y quebradas, estas labradas por acción de las aguas de las lluvias. Tenemos así a la quebrada Tinajones entre otras más pequeñas.

### **Estribaciones de la Cordillera Occidental**

Esta unidad geomorfológica corresponde a las laderas y crestas marginales de la Cordillera Andina de topografía abrupta formada por rocas sedimentarias e ígneas, que conforman plutones y stocks del Batolito Costanero, estos emplazados con rumbo NO-SE. Estos plutones han sido disectados por los ríos y quebradas que se abren camino hacia la costa, formando valles profundos con flancos de fuerte inclinación, en donde las crestas más elevadas se estiman entre los 900 y los 3,600 m reflejando la fuerte erosión de los ríos durante el Pleistoceno-reciente. Las estribaciones de la cordillera occidental terminan hacia el Oeste en la zona de lomas con pendientes menos abruptas y menores de 30°.

### **Valle del río Lurín**

El río Lurín, con un largo de 108,57 kilómetros, es un río ubicado en el Departamento de Lima, Perú. Se origina en los glaciares y lagunas de los Andes occidentales y es conocido como el río Chalilla hasta su confluencia con el riachuelo Taquí a partir de donde recibe su nombre común. Sus principales afluentes son el Taquí, Llacomayqui, Tinajas, Numincancha y Canchahuara en su margen izquierdo y el Chamacna en el derecho. Atraviesa las provincias de Huarochirí y Lima en el departamento de Lima antes de desembocar en el Océano Pacífico. La cuenca del río Lurín cubre un área de 1.670 kilómetros cuadrados.

#### **5.2.1.2. Litología Regional**

##### **a) Grupo Morro Solar**

Comprende las formaciones geológicas Herradura y Marcavilca.

##### **Formación Herradura**

La Formación Herradura descansa concordante sobre la Formación Salto del Fraile e infrayace igualmente concordante a la Formación Marcavilca. En el valle del Chillón por las observaciones realizadas en la quebrada afluente denominada Gangay, se supone que la parte inferior de esta formación debe encontrarse en contacto transicional, directamente sobre la Formación Cerro Blanco pues en ésta se observan niveles sedimentarios de facies similares a los de la Formación Herradura de la localidad típica. Esta formación es una unidad incompetente dentro del Grupo Morro Solar debido a su litología arcillosa, viéndose esto favorecido por su contenido de sales como yeso y cloruro de sodio, probablemente como producto de fenómenos diagenéticos en un medio salino.

### **Formación Marcavilca**

La Formación Marcavilca descansa en contacto normal sobre la Formación Herradura y subyace a la Formación Pamplona. Sus afloramientos se extienden desde el Morro Solar en Chorrillos donde tiene su localidad típica, hasta el Norte de Lima (espalda de la Universidad de Ingeniería) prolongándose hasta el valle del Chillón.

#### **b) Grupo Lima**

Comprende las formaciones geológicas Pamplona y Atocongo

### **Formación Pamplona**

La Formación Pamplona, marca el inicio de una transgresión que alcanza su pleno desarrollo con la Formación Atocongo. Su litología presenta rocas calizas de tonos grisáceos en bancos delgados, alternando con lutitas limolíticas amarillo rojizas con niveles tobáceos, margas gris verdosas con presencia de yeso. Su espesor se estima entre 600 y 700 m. su edad geológica es del Cretácico inferior.

### **Formación Atocongo**

Esta formación aflora en varios lugares del sur de Lima, como en Pachacámac, se relaciona concordantemente con la Formación Pamplona, pasando de una facie arcillo calcárea a una facie calcárea. Su litología está representada por calizas margosas en capas delgadas, finamente laminadas. Calizas afaníticas gris plomizas, calizas metamorizadas con tonalidades oscuras, bancos gruesos de calizas silicificadas, parcialmente con fenos de cuarzo, presenta tonalidades grises a verdosas. Calizas metamorizada y areniscas en paquetes gruesos. Su espesor varía de 250 a 300 m. Siendo su edad geológica es del Cretáceo inferior.

#### **c) Depósitos inconsolidados**

Son materiales inconsolidados, de edad geológica reciente (Cuaternario), que tapizan las rocas existentes; en el distrito se extienden ampliamente, de preferencia hacia el Oeste.

### **Depósitos Marinos**

Se trata de depósitos litorales, caracterizados por materiales clásticos, llevados al mar como carga por los ríos y también como resultado de la acción erosiva de las olas y distribuidos por corrientes marinas de deriva. Estos depósitos que han existido siempre y continúan formándose en los actuales tiempos, se les encuentra a lo largo de la línea de costa, en las hojas de Chancay, Lima y Lurín habiéndoseles clasificado como Depósitos Marinos Pleistocénicos (los más antiguos) y Depósitos Marinos Recientes (los más modernos). Los depósitos marinos pleistocénicos están constituidos por antiguos depósitos de abrasión marina dentro de ellos se tiene terrazas marinas y zona de marismas.

**Terrazas marinas:** Se han formado como resultado de levantamientos de la costa, se les encuentra en el sector litoral del cuadrángulo de Chancay, comprendido entre los cerros de Pasamayo y Lomas de Ancón, formando estrechas plataformas a una altura de 15 a 20 m.s.n.m., conformados por areniscas grises claras de grano medio, ligeramente cementadas por soluciones calcáreas, conteniendo algunos restos de conchuelas fragmentadas y gravas subredondeadas. Estas terrazas evidencian un continuo levantamiento del macizo continental durante el Cuaternario. Su reducida exposición probablemente se deba a una significativa destrucción en tiempos recientes o al limitado desarrollo durante su deposición.

**Zona de marismas (albuferas):** Geomorfológicamente constituyen áreas bajas con cotas máximas de 5 a 6 m. y mínima de 1 m.s.n.m. habiéndoseles reconocido, al sureste de la localidad de Chancay, en las pampas de Ventanilla y en el sector de Villa al sur de La Chira. Litológicamente están conformadas por arenas grises de grano medio, incoherentes y friables; poseen un elevado contenido de sales, las mismas que destacan en superficie a manera de costras por efectos de evaporación por capilaridad; intercalándose horizontes lenticulares de gravas que reflejan cambios en la deposición y en la velocidad de las corrientes, asociados probablemente a las variaciones estacionales del clima. Genéticamente representan playas abandonadas debido a la emergencia paulatina del borde litoral. Inicialmente, han debido originarse con el desarrollo de una barra o cordón litoral que gradualmente fue controlando el avance del mar hacia el continente, hasta que por último quedó tierra adentro una zona de marismas o albuferas, que luego fueron rellenándose progresivamente con arena proveniente de las playas.

En la actualidad, las marismas se ven afectadas por un proceso de colmatación eólica parcial, con arenas provenientes de las playas adyacentes; las áreas inafectadas a colmatación son por lo general pantanosas o tienen superficies húmedas provistas de vegetación que alcanza en ciertos casos hasta 1 m. de altura. El cordón litoral de algunas marismas ha sido destruido por la actividad humana, como es el caso del balneario de Ventanilla donde ha sido reemplazado por un dique de 2.50 m. de altura que corre paralelo a la línea de costa y que controla eventualmente inundaciones del mar. Los depósitos marinos recientes, comprende la acumulación de arenas, limos y cantos reabajados y distribuidos por corrientes a lo largo del borde litoral producto de erosión y disgregación de las rocas de los acantilados, así como de los materiales acarreados por los ríos al océano. Estos depósitos están constituidos principalmente por arenas de grano medio a fino de color gris amarillento conteniendo cuarzo, micas, ferromagnesianos; y en menor proporción limos inconsolidados de color gris claro con restos de conchas marinas. Las acumulaciones litorales de arena también contienen restos marinos,

asociados en algunos casos con horizontes lenticulares de gravas (Playas de Pasamayo y hacia el norte).

La continuidad de estas franjas de playa es interrumpida por los espolones rocosos de las estribaciones andinas que avanzan hasta la línea litoral, creando acantilados verticales importantes, habiéndose formado en algunos casos las escarpas en los depósitos aluviales antiguos.

### **Depósitos Aluviales**

Estos depósitos están constituidos por materiales acarreados por los ríos que bajan de la vertiente occidental andina cortando a las rocas terciarias, mesozoicas y Batolito Costanero, tapizando el piso de los valles, habiéndose depositado una parte en el trayecto y gran parte a lo largo y ancho de sus abanicos aluviales, dentro de ellos tenemos: aluviales pleistocénicos (más antiguos) y aluviales recientes.

Los depósitos aluviales pleistocénicos se encuentran formando los conos de deyección de los ríos Chancay, Rímac y Lurín ostentando espesores del orden de decenas de metros, sobre los que se asientan los centros urbanos y la agricultura por lo que adquieren una significativa importancia para la región; ya que ellos contienen acuíferos notables que dan vida a numerosas poblaciones y gran parte de la agricultura.

La litología de estos depósitos aluviales pleistocénicos vistos a través de terrazas, cortes y perforaciones comprende conglomerados, conteniendo cantos de diferentes tipos y rocas especialmente intrusivas y volcánicas, gravas sub angulosas cuando se trata de depósitos de conos aluviales desérticos debido al poco transporte, arenas con diferente granulometría y en menor proporción limos y arcillas. Todos estos materiales se encuentran intercalados formando paquetes de grosores considerables como se puede apreciar en los acantilados de la costa. Los niveles de arena, limo y arcilla se pierden lenticularmente y a veces se interdigitan entre ellos o entre los conglomerados.

El espesor de estos depósitos aluviales es desconocido, pero se infiere por las perforaciones realizadas por agua subterránea en la gran Lima. El pozo más profundo sería el que se perforó en el Hospital Daniel Alcides Carrión con 210 m., todo en aluvial. Asimismo, estudios geofísicos realizados en Lima han demostrado que tanto el aluvial del Rímac como el del Chillón sobrepasan los 400 m. de grosor. Gran parte de la ciudad capital se asienta sobre estos depósitos, los mismos que contienen acuíferos notables que abastecen gran parte de la población y buena parte de la agricultura de estos valles.

La edad de estos depósitos es desconocida; sin embargo, dado su gran volumen es evidente que su deposición viene desde el Pleistoceno,

habiendo tenido periodos de rejuvenecimiento de los ríos que han dado lugar a varios niveles de terrazas fluviales.

Los depósitos aluviales recientes, son depósitos se restringen a franjas estrechas a ambos márgenes de los ríos, en los valles de Chancay, Chillón, Rímac, Lurín y Chilca. Estos depósitos son observables desde la altura de Puente Piedra, y aguas abajo hasta la garganta Márquez conformando las terrazas del mismo nombre estando constituidos predominantemente de material grueso compuesto de cantos y gravas sub-redondeadas en matriz arenosa, con materiales finos en forma subordinaría y en niveles más profundos.

Los depósitos más jóvenes incluidos dentro de estos aluviales recientes son materiales que se encuentran en el lecho actual de los ríos, que en áreas planas y bajas de los valles pueden alcanzar su mayor amplitud.

Los materiales constituyentes son principalmente cantos y gravas sub redondeadas con buena selección en algunos casos de matriz arenosa; se los puede considerar como depósitos fluvio aluviales; generalmente ofrecen condiciones desfavorables para la agricultura por ser muy pedregosos.

### **Depósitos Eólicos**

Están conformados por las arenas móviles. Estas arenas proceden de las diversas playas del litoral, en su movimiento adoptan variadas formas como mantos, dunas y barjanas.

Los mantos son los más comunes, generalmente cubren las laderas occidentales de los cerros al Sureste y Noreste de Lima o algunas llanuras aluviales, alcanzando mayores espesores en las depresiones o desniveles topográficos, exhibiendo en superficie ondulaciones y crestas.

Las dunas son colinas de arena en movimiento con formas de media luna, se presentan aisladas sobre los mantos de arena o sobre roca in situ; algunas de ellas, las más grandes, se aproximan en sus dimensiones a las dunas semilunares. Las dunas longitudinales tienen buen desarrollo y las más importantes alcanzan longitudes de hasta 12 km y preferentemente tienden a migrar hacia el Noroeste.

Los barjanas se observan también sobre mantos de arena y sobre rocas in situ, como pequeñas colonias de barjanas con alturas de hasta 2m y movimiento en la dirección preferencial de los vientos dominantes.

Los depósitos eólicos pleistocénicos están conformados por acumulaciones eólicas antiguas y que en la actualidad están estabilizados conformando lomadas y cerros de arena; como los cerros Salinas, Macatón, Redondo, en la margen oriental de los cerros Pasamayo y diente

hasta cerro Lomada Ancón, entre el norte de Lima y Chancay. Estas arenas han debido tener una estructura de dunas que probablemente se han borrado con el proceso de estabilización, ahora se muestran como grandes extensiones en forma de mantos de arena cuyas superficies tienen un modelado suave con coloraciones grises.

Los depósitos eólicos recientes, son arenas móviles ampliamente propagadas en la zona de estudio. Estas arenas provienen de las playas del litoral y en su movimiento adoptan varias formas como mantos, dunas y barjanes.

En la región norte de Lima se observan barjanes sobre mantos de arena estable y sobre rocas in situ, como pequeñas colonias de barjanes con alturas de hasta 2 m. y movimiento en la dirección preferencial de los vientos dominantes.

#### **d) Rocas intrusivas**

Las rocas ígneas del área pertenecen al Batolito de la Costa. Según su antigüedad, las rocas observadas pertenecen a las siguientes super unidades:

##### **Super unidad Patap**

Está constituido por gabros y dioritas, las más antiguas del Batolito. Los gabros tienen minerales que varían texturalmente de grano medio a grueso conteniendo plagioclasas en un 30 %. Intruyen a las rocas sedimentarias y volcánicas del Mesozoico a las que metamorfizan. Las dioritas presentan un color gris oscuro con grano fino a medio, muestran adiciones de cuarzo en los contactos con las tonalitas de la super unidad Santa Rosa.

##### **Super unidad Santa Rosa**

Está constituido por cuerpos tonalíticos – dioríticos y tonalíticos – granodioríticos, tienen una gran extensión. Se emplazaron posteriormente a los gabros y dioritas de la super unidad Patap. Se le divide en cuerpos oscuros (diorita – tonalitas) y cuerpos claros (tonalita – granodioritas). En el Mapa A.4-1 del Anexo A.4 se presenta el mapa geológico regional, el cual ha sido elaborado en base a la información de la hoja 25j del Cuadrángulo de Lurín, del INGEMMET.

#### **5.2.1.3. Geología Estructural Regional**

En el sector occidental, es evidente un Sistema de Fallas Longitudinales, vinculadas a una fase de compresión intracretácea, así como un sistema de fracturas y fallas transversales que obedecen a procesos tectónicos de compresión post-Batolito; es decir del Terciario inferior y superior.

### **Sistema de Fallas longitudinales**

La mayoría abarca longitudes kilométricas y han producido dislocaciones en los flancos de los Anticlinales de Lima, Lomas del Manzano y otros, habiéndose reconocido fallas inversas y fallas normales de menor orden localizadas preferentemente en las zonas axiales. Estos fallamientos originados probablemente al final de la fase intra cretácea han sufrido reactivaciones con los procesos tectónicas cenozoicos. Las observaciones micro tectónicas y relaciones geológicas muestran en el fallamiento longitudinal una dirección NO-SE, paralela a la cadena andina.

#### **5.2.2. Geología Histórica**

La historia geológica del área está vinculada al geosinclinal andino. Dentro de este geosinclinal, la cuenca de Lima se ubica en la margen occidental con características de Eugeosinclinal pasando hacia el Este a Mio geosinclinal. Su borde Oeste estaría en la Cordillera de la Costa y su borde este se hace difícil fijarlo dado que el batolito irrumpe, rompiendo las relaciones entre las facies occidental y facies oriental (Mio geosinclinal). Sin embargo, es evidente que el mar mesozoico a lo ancho de la cuenca andina se extendía hasta las inmediaciones de la Cordillera Oriental.

Las rocas más antiguas de las que hay testigos a través de sus afloramientos corresponden, en el Noreste del área, a sedimentos clásticos y calcáreos con una actividad volcánica que deviene del Jurásico medio a superior; mientras que hacia el Oeste y Norte de Lima (sector Puente Piedra-Ancón) el volcanismo era intenso con un foco que emitía materiales como lavas, brechas y cenizas que se van adelgazando hacia el Sur y hacia el Este. Otro foco volcánico se ubicaría al Sur del río Chillón entre los cerros Milla y Mullería de donde los derrames y piroclásticos que se asentaban en un medio marino se adelgazan lateralmente para interdigitarse con los sedimentos arcillosos reconocidos como Formaciones Puente Inga y La Pampilla (Estudio Geológico-Tectónico del Área de Lima, INGEMMET, 1981). El batolito costanero continuó su emplazamiento a manera de pulsaciones, conformando un complejo de plutones individuales cuya acidez se hace más acentuada tardíamente (Superunidades Santa Rosa, Patap y Tiabaya).

Durante el Terciario inferior y en un área ya completamente emergida se produce una segunda fase de compresión que se manifiesta en la costa como de ruptura, observable en las unidades intrusivas del batolito y que hacia el sector andino repliega a la secuencia mesozoica y pliega a las Capas Rojas (Fase Incaica). Luego como resultado de esta tectónica de compresión se inicia un período de distensión que da lugar a un vulcanismo continental de tipo piroclástico.

Finalmente, a fines del Terciario y comienzos del Cuaternario se inicia otro proceso erosivo intenso el mismo que se prolonga hasta la actualidad,

profundizando valles, denudando y acarreado materiales hacia las llanuras costeras formando los abanicos aluviales que se extienden entre Chancay, Lima y Lurín y que alcanzan una potente secuencia de arena, cascajo y material conglomerádico que forma el soporte de la ciudad capital. Durante el Cuaternario antiguo parece ser que las lluvias fueron intensas lo que ocasionó un acarreo fuerte con el consiguiente relleno de los conos aluviales en las quebradas laterales.

Las terrazas fluviales y marinas nos estarían señalando que por lo menos en el Pleistoceno debieron ocurrir levantamientos con la epirogenesis andina y aunque esto no está completamente aclarado, de todos modos, por las observaciones del Cuaternario, en la costa central del país, se señala movimientos verticales que afectaron a los depósitos aluviales y marinos antiguos.

### 5.3. Marco Geológico Local

El distrito de Cieneguilla, presenta geoformas subordinadas al emplazamiento de rocas sedimentarias e intrusivas, que conforman los cerros del distrito, asimismo por la erosión fluvial, eólica, que han depositado materiales disgregados. Actualmente, este distrito se está urbanizando de manera rápida, ocupando la mayor parte de los terrenos presentes, ya sea los terrenos llanos, como las laderas de los cerros, incluso en las cumbres de la mayoría de los cerros del distrito, ya existen viviendas.

En los trabajos de campo, se ha permitido delinear las geoformas existentes y la identificación de los materiales masivos como disgregados, que componen este distrito. Aparte de la inspección geológica de campo, se aperturó calicatas, y se realizó trabajos de prospección geofísica, cuya información proporcionada nos corroboró los datos geológicos.

#### 5.3.1. Geomorfología Local

El modelamiento de las diferentes unidades geomorfológicas locales, en el área de estudio, se han producido por modelamiento debido a la acción geológica del agua (aguas superficiales y de lluvias extraordinarias) y del viento, que han producido las geoformas actuales. Últimamente la actividad antropogenética constituida mayormente por construcción de viviendas y habilitaciones urbanas, han trastocando la superficie del distrito. Las geo formas locales actuales se pueden clasificar según los ítems que se exponen a continuación.

#### Terrenos llanos

Los terrenos llanos, se observan en los terrenos litorales y en el cauce final del río Lurín, al SO del distrito. También se observan llanuras semi planas, algo ondulantes, su origen fue por depositación de materiales aluviales, observados en el norte y nor este, relacionadas con el cauce del río Lurín y de la quebrada Tinajas. Estos terrenos fueron utilizados antiguamente

como campos de cultivo, habiéndose construido varios canales de riego, actualmente ocupados por viviendas.

### **Lomadas**

Son cerros de pequeña altitud, observados principalmente al este y oeste del distrito; presentan laderas con pendientes moderadas, estas se prolongan hacia los terrenos de superficie plana. Progresando más hacia el sur, se observan lomadas de cumbres alargadas, constituidas por acumulación de arena eólica. En la parte norte y central del distrito se aprecian lomadas de baja altimetría, en medio de las llanuras semi planas. Las lomadas más pequeñas, son producto de médanos (dunas). Todas estas lomadas están cubiertas con arenas finas acarreadas por el viento.

### **Área de Colinas**

En el norte del distrito, se encuentran colinas de mayor altitud que las lomadas, mayormente conformadas por rocas intrusivas, son cerros que corresponden a las estribaciones de la Cordillera Occidental, presentan laderas de pendiente moderada a fuerte. De estas colinas, bajan pequeñas quebradas y cárcavas (actualmente secas). Estas colinas también están tapizadas por materiales finos (areno limosos), acarreados por el viento. Las cumbres de estas colinas sirven como límite distrital con los distritos vecinos; también actualmente se están ocupando por viviendas.

### **Quebradas**

Existe una quebrada al noreste del distrito, denominada quebrada Tinajas. Esta quebrada en las temporadas que tría agua, habría acarreado materiales aluviales. También de los cerros bajan pequeñas quebradas como cárcavas que en épocas de lluvias extraordinarias, han acarreado materiales tipo derrubios. También existe en el distrito la quebrada Tambo Viejo, actualmente con fuerte dinamismo de construcción de viviendas.

En el Mapa A.4-3 del Anexo A.4 se presenta el mapa geomorfológico local, el cual ha sido elaborado en base a las observaciones de campo dentro de la zona de estudio.

## **5.3.2. Litoestratigrafía Local**

La litología local, está representada por afloramientos de rocas mayormente sedimentarias e ígneas intrusivas, y materiales disgregados que forman depósitos inconsolidados, cuya granulometría van desde fragmentos pelíticos (limos – arcillas) hasta bloques que pueden tener diámetros de más de 1 m. Se describe las características litológicas de estas rocas y materiales sueltos existentes en el distrito de Cieneguilla:

### **a) Depósitos aluviales**

Los depósitos aluviales se encuentran en el valle del río Lurin, están distribuidos en todo el distrito, ocupando los terrenos llanos; constan de

gravas angulosas y sub redondeadas de origen polimícticos, y tamaños heterométricos mal clasificadas, unidos por una matriz arcillosa arenosa. El origen de estos depósitos aluviales, se debe al transporte de materiales por el río Lurín; de este río antiguamente se originarían quebradas secundarias, que acarrearon estos materiales al área que ocupa el distrito. Mayormente, los depósitos aluviales están cubiertos por arenas de origen eólica. El grosor de la depositación de estas arenas, varía mucho, por ejemplo, será mayor en los terrenos planos, debido a que de las arenas que se depositaban en las laderas, por gravedad se deslizaban hacia las llanuras.

### **b) Depósitos eólicos**

Los materiales más notorios que se encuentran superficialmente, son arenas de origen eólico. Se han acumulado más notablemente el sector litoral del distrito. Se puede diferenciar dos épocas geológicas de depositación de estas arenas, de esta manera:

#### **Depósitos Eólicos Pleistocenos**

Son los más antiguos, estos materiales traídos por el viento, granulométricamente varían de arcillas a arenas finas, tienen tonalidades gris parduscas, presentando cierto grado de compactación. Se ubican al sur oeste del distrito de Cieneguilla.

Un ejemplo notorio de este evento es cerro Lomo de Corvina, que queda fuera del área del distrito. Estos depósitos eólicos se encuentran mezclado con material muy fino limo arcilloso, posiblemente depositados por aguas tranquilas de origen pluvial, que posteriormente, fueron transportados por el viento. Son las acumulaciones de arenas más antiguas.

#### **Depósitos Eólicos Recientes**

Estos depósitos de arena de depositación reciente, cubren las todas las geoformas existentes, son de granulometría muy fina y de tonos beige claro. Estos depósitos constantemente migran de lugar, por medio de la fuerza del viento formando dunas. En ciertos lugares se acumulan formando espesores de varios metros; se encuentran tapizando tanto los terrenos planos, como trepando lomadas y colinas.

### **c) Depósitos de flujo de lodo y rocas**

En el área de estudio, se apreció estos depósitos, a lo largo de las quebradas, en algunos sectores están ocupados por construcciones.

### **d) Depósitos antropogénicos**

Los terrenos, preferentemente llanos, han sido trastocados por actividad humana. Primero fueron utilizados para agricultura, existiendo antiguamente en el distrito grandes campos de cultivo; actualmente hay un dinamismo en hacer diferentes construcciones en el distrito, debido a esto, se ha trastocados la superficie natural de los terrenos. Se aprecian

explicaciones para construcción de viviendas, cortes en roca para apertura de caminos carrozables y viviendas.

#### **e) Rocas sedimentarias**

Rocas sedimentarias son del tipo calizas, margas, limo arcilloso y lutíticas, estas rocas son las de mayor distribución, generalmente se encuentran al este y oeste del distrito conformando colinas de altimetría media.

#### **f) Rocas intrusivas**

En la parte este del distrito, afloran pequeños cuerpos de rocas ígneas intrusivas, mayormente del tipo gabro – diorita, granodiorita. Estas intruyen a rocas calizas. Estas rocas forman las colinas de mayor altimetría del distrito, actualmente sus laderas están siendo ocupadas por viviendas.

En el Mapa A.4-2 del Anexo A.4 se presenta el mapa geológico local, el cual ha sido elaborado en base a las observaciones de campo dentro de la zona de estudio. Un registro fotográfico de estas observaciones de campo se encuentra en el Anexo A.2 del Anexo A.

### **5.3.3. Aspectos Geo Estructurales Locales**

En el distrito de Cieneguilla, se aprecia manifestaciones geo estructurales producto de la tectónica andina. Se aprecian fallas de gran longitud, con rumbos N-O a SE, mayormente cubiertas por materiales disgregados como arenas. Existen también manifestaciones neo tectónicas de edad geológica reciente, que hace que los terrenos tengan ciertas basculaciones, con desplazamientos pequeños.

## **6. PELIGRO SÍSMICO PROBABILÍSTICO**

### **6.1. Características Geomorfológicas**

En el presente ítem se describe la zonificación morfológica de la región en estudio, la cual se basa en la zonificación propuesta por Tavera y Buforn (1998).

La morfología regional se puede agrupar en las siguientes tres grandes zonas:

- Zona I: Costanera
- Zona II: La Cordillera Occidental, el Altiplano y la Cordillera Oriental.
- Zona III: Subandina

Esta clasificación simplifica las características de topografía, geología, geomorfología, clima y de mecánica de rocas predominantes en la región que tienen influencia en la respuesta sísmica del terreno de cimentación y en el comportamiento dinámico de las estructuras proyectadas. Debido a que la zona de estudio se ubica en la costa, a continuación, se describe la Zona I que tiene influencia directa en el área de estudio.

La Zona I está conformada por la Franja Costera, consistente en una delgada franja de terreno limitada por el Oeste con el litoral y por el Este con el Batolito

Costanero. Se extiende de Norte a Sur con un ancho de 40 km a 50 km y está formado en su mayoría por el basamento fuertemente plegado que está sujeto a deformaciones desde el Precámbrico.

En esta zona las laderas de los cerros son suaves y la mayor parte del suelo y subsuelo son sedimentos cuaternarios de limos, arenas y arcillas que cubren formaciones rocosas principalmente volcánicas, así como extensas terrazas formadas por gravas, gravas arenosas sueltas y saturadas. En este tipo de terreno y especialmente en los lechos de los ríos se puede presentar el fenómeno de licuación de suelos tanto en arenas como en gravas, (Martínez, A., 1996). La condición de aridez de la costa es favorable, sin embargo, en algunas zonas puede existir la influencia de la migración de arenas eólicas y en épocas de lluvias extraordinarias como las generadas por el Fenómeno del Niño en el año 1998, se pueden generar asentamientos con deformaciones superficiales importantes.

## 6.2. Neotectónica de las Principales Fuentes Sismogénicas

### 6.2.1. Emplazamiento Tectónico Regional

El Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que hay en la tierra, formando parte del Cinturón Circumpacífico. El marco tectónico regional a mayor escala está gobernado por la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana. Los principales rasgos tectónicos de la región occidental de Sudamérica, como son la Cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú-Chile, están relacionados con la alta actividad sísmica y otros fenómenos telúricos de la región, como una consecuencia de la interacción de dos placas convergentes cuya resultante más notoria precisamente es el proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes.

La teoría que postula esta relación es la Tectónica de Placas o Tectónica Global (Isacks et al, 1968). La idea básica de la teoría de la Tectónica de Placas es que la envoltura más superficial de la tierra sólida, llamada Litósfera (100 Km), está dividida en varias placas rígidas que crecen a lo largo de estrechas cadenas meso-oceánicas casi lineales; dichas placas son transportadas en otra envoltura menos rígida, la Astenósfera, y son comprimidas o destruidas en los límites compresionales de interacción, donde la corteza terrestre es comprimida en cadenas montañosas o donde existen fosas marinas (Berrocal et al, 1975). El mecanismo básico que causa el movimiento de las placas no se conoce, pero se afirma que es debido a corrientes de convección o movimientos del manto plástico y caliente de la tierra y también a los efectos gravitacionales y de rotación de la tierra.

Los límites o bordes de las placas raramente coinciden con las márgenes continentales, pudiendo ser de tres tipos:

- Según cordilleras axiales, donde las placas divergen una de otra y en donde se genera un nuevo suelo oceánico.
- Según fallas de transformación a lo largo de las cuales las placas se deslizan una respecto a la otra.
- Según zonas de subducción, en donde las placas convergen y una de ellas se sumerge bajo el borde delantero de la suprayacente.

Se ha observado que la mayor parte de la actividad tectónica en el mundo se concentra a lo largo de los bordes de estas placas. El frotamiento mutuo de estas placas es lo que produce los terremotos, por lo que la localización de éstos delimitará los bordes de las mismas.

La margen continental occidental de Sudamérica, donde la Placa Oceánica de Nazca está siendo subducida por debajo de la Placa Continental Sudamericana, es uno de los mayores bordes de placa en la Tierra.

La Placa Sudamericana crece de la cadena meso-oceánica del Atlántico, avanzando hacia el noroeste con una velocidad de 2 a 3 cm por año y se encuentra con la Placa de Nazca en su extremo occidental, constituido por la costa Sudamericana del Pacífico. Por otro lado, la Placa de Nazca crece de la cadena meso-oceánica del Pacífico Oriental y avanza hacia el Este con una velocidad de aproximadamente 5 a 10 cm por año, subyaciendo debajo de la Placa Sudamericana con una velocidad de convergencia de 7 a 12 cm por año (Berrocal et al, 1975).

Como resultado del encuentro de la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca y la subducción de esta última, han sido formadas la Cadena Andina y la Fosa Perú-Chile en diferentes etapas evolutivas. El continuo interaccionar de estas dos placas da origen a la mayor proporción de actividad sísmica de la región occidental de nuestro continente. La Placa de Nazca se sumerge por debajo de la frontera Perú-Brasil y noroeste de Argentina, lo cual es confirmado por la distribución espacial de los hipocentros, aun cuando existe cierta controversia debido a la ausencia de actividad sísmica entre los 300 y 500 Km de profundidad (Berrocal et al, 1975).

Algunos trabajos de sismotectónica en Sudamérica han señalado ciertas discontinuidades de carácter regional, que dividen el panorama tectónico de esta región en varias provincias tectónicas. Dichas provincias están separadas por discontinuidades laterales (Berrocal, 1974) o por "zonas de transición" sismotectónicas (Deza y Carbonell, 1978), todas ellas normales a la zona de subducción o formando un ángulo grande con ésta. Estas provincias tectónicas tienen características específicas que influyen en la actividad sísmica que ocurre en cada una de ellas.

### 6.2.2. Zonificación Tectónica

En el Perú la deformación cuaternaria de la corteza es generada por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, cuyos efectos se concentran en el proceso de orogénesis de los Andes. Los Andes Peruanos se ubican en la zona central de la Cordillera de los Andes, que se extiende desde el Golfo de Guayaquil ( $4^{\circ}$  S) hasta el Golfo de Penas en Chile ( $46^{\circ}30'$  S). En los Andes Peruanos se pueden distinguir dos zonas en función a la geometría de la subducción, los cuales son conocidos como Sector Norte y Sector Central. Durante el Mesozoico temprano, el Sector Norte ( $4^{\circ}$  S a  $14^{\circ}$  S), fue dominado por un tectonismo extensional y la subducción, subsecuentemente, la migración de la deformación hacia el Este elevó los Andes Peruanos como resultado de un proceso de subducción plano y poco profundo. El resultado del engrosamiento de la corteza dio origen a la Cordillera Blanca donde se presentan un número significativo de fallas normales activas, así como también a una importante actividad sísmica superficial que caracteriza a la Cordillera Oriental y a la zona Subandina, donde la deformación es dominada por fallas relacionadas a las estructuras de plegamientos. Un comportamiento atípico es la falta de actividad volcánica en este sector (Macharé et al, 2003).

El sector central de los Andes ( $14^{\circ}$ - $27^{\circ}$  S) está asociado al proceso de subducción que en esta zona presenta un ángulo de  $30^{\circ}$  al arco volcánico activo. Este sector es caracterizado por un cambio brusco en el ángulo de subducción con respecto al sector Norte, debido a la presencia de la Dorsal de Nazca que subduce bajo la placa Sudamericana, así como a una zona de transición suave hacia otro sector de subducción plana y poco profunda en la región sur de este sector, localizado al norte de Argentina (Macharé et al, 2003).

Dentro de los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente debido a la colisión de la placa de Nazca con la placa Continental Sudamericana, se encuentran los siguientes (Pomachagua, O., 2000):

- La Fosa Marina: La fosa marina indica de Norte a Sur y paralelo al litoral costero, el límite de contacto entre la placa oceánica y la placa continental. Este límite tiene la forma de una fosa de gran extensión, la misma que alcanza profundidades de hasta 8000 m. Esta fosa está formada por sedimentos que han sido depositados sobre rocas pre-existentes.
- La Cordillera Andina: La Cordillera Andina se ha formado como producto del proceso de compresión entre la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana en diferentes procesos orogénicos. Esta cordillera está conformada en general por rocas ígneas plutónicas que afloraron a la superficie terrestre por procesos tectónicos. La

Cordillera Andina se distribuye en el Perú de Norte a Sur, alcanzando un ancho de 50 Km aproximadamente en las regiones Norte y Centro, y hasta de 300 Km en la región Sur. Así mismo, la Cordillera Andina se orienta en promedio en dirección NW-SE, aunque a la altura de la latitud 13° S ésta se orienta en dirección E-W, a lo largo de la deflexión de Abancay.

- Los Sistemas de Fallas: Los diferentes sistemas de fallas que se distribuyen en la zona continental se han formado como un efecto secundario de la colisión de la placa oceánica con la placa continental. Este proceso generó la presencia de plegamientos y fracturas en la corteza terrestre. Los sistemas de fallas mayormente se localizan en el altiplano y en la región subandina de Norte a Sur, así como también en los pies de las cordilleras o nevados y entre los límites de la Cordillera Occidental y la zona costera.
- La Cadena Volcánica: La formación de la cadena volcánica se debe a la colisión entre los márgenes de las placas de Nazca y Sudamericana. En el Perú la cadena volcánica se localiza en la región Sur de la Cordillera Occidental, con conos volcánicos activos como los de Ampato, Coropuna, Paucarani, Misti, Ubinas, Sarasara, etc. En la región Norte y Centro de Perú hay un ausentismo de volcanes debido a que el proceso de subducción en estas regiones tiende a ser casi horizontal.
- Dorsal de Nazca: Esta cadena montañosa o cordillera se localiza en el Océano Pacífico entre las latitudes 15° S y 19° S. La estructura de la Dorsal de Nazca es producto de un proceso de distensión de la corteza oceánica y se estima que su formación tiene una edad de 5 a 10 millones de años. Esta dorsal tiene una influencia decisiva en la constitución tectónica de la parte occidental del continente, donde se nota un marcado cambio en la continuidad de otros rasgos tectónicos. En la parte oceánica, la Dorsal de Nazca divide la Fosa Oceánica en la Fosa de Lima y la Fosa de Arica.

### 6.2.3. Sistemas de Fallas en la Región Central del Perú

Los sistemas de fallas, cuyo origen se debe a una distribución heterogénea de esfuerzos tensionales y compresionales, son la principal fuente de actividad sísmica superficial en el territorio peruano. En la región centro del Perú, que es materia de este estudio, se puede reconocer el siguiente sistema de falla, ya sea por su manifestación en la superficie o por la distribución de sismos sobre su plano de falla (Pomachagua, O., 2000; Bernal, I., 2000)

- Falla San Lorenzo: Según el estudio Sebrier et al (1982), existe una falla a pocos kilómetros frente a la ciudad de Lima conocida como falla

San Lorenzo, que pertenece al Cuaternario y ha sido deducida de la diferencia de comportamientos verticales entre el continente y la isla San Lorenzo, que ha levantado el bloque Oeste. Es decir, la costa del Perú central ha estado sometida a un régimen de hundimiento durante todo el Cuaternario. De la comparación de las alturas a que se hallan los niveles holocenos, tal falla habría actuado como máximo en el Pleistoceno Superior y por lo tanto no tiene las características de una falla activa pese a ser reciente. El perfil batimétrico entre el Cercado de Lima y la isla de San Lorenzo muestra una depresión denominada El Boquerón. Es posible que este rasgo señale la traza de la mencionada falla, cuya longitud se podría estimar en 30 km.

El Mapa B.3-5 del Anexo B.3 muestra las características neotectónicas de la región en estudio. Cabe mencionar que la delimitación de esta estructura geológica es de carácter regional, por lo que muchas de las fallas representadas en estos mapas corresponden a los alineamientos principales de los sistemas de fallas identificadas e inferidas en los estudios de neotectónica disponibles.

### 6.3. Sismotectónica Regional

Para visualizar la actividad sísmica de la región en estudio y su correlación con la tectónica regional, se han elaborado los Mapas B.3-3 de Densidad Sísmica, B.3-4 de Distribución de Epicentros y B.3-5 de Neotectónica Regional (ver Anexo B.3). En ellos se muestran los rasgos neotectónicos indicados por Sebrier et al (1982) para el Perú, así como los hipocentros del Catálogo Sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) revisado y depurado para el periodo 1901-2001, complementado con el catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC) y del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para el periodo 2001-2015, con representación de la localización, magnitud y profundidad focal de los sismos.

El importante índice de actividad sísmica observado en la zona costera y la existencia de la fosa Perú-Chile, indican claramente la presencia de una zona de subducción, donde la Placa de Nazca se introduce bajo la Placa Sudamericana generando sismos de elevadas magnitudes con relativa frecuencia. Estudios de la sismicidad de la región sur del Perú (Deza, 1969) indican la existencia de una "zona de transición" situada entre los 13° S y 15° S, en la cual la Placa de Nazca soportaría una contorsión sobre una ancho de 200 Km aproximadamente; la misma que coincide con la Deflexión de Abancay. Esta contorsión explicaría la diferencia entre la distribución hipocentral de los sismos de subducción en las regiones central y sur del Perú.

Todos los sismos en la porción oceánica corresponden a la zona de subducción, mientras que en la porción continental se incluyen los sismos de la zona de Benioff, con profundidades focales mayores de 70 Km y los sismos continentales que son superficiales.

En el Mapa B.3-3 del Anexo B.3 se aprecia que en la porción oceánica existe una alta densidad sísmica superficial (sismos con profundidad focal menores a 70 Km.) concentrados casi exclusivamente entre la fosa marina y la línea de la costa. En la porción continental se aprecia una alta densidad sísmica superficial debido a la actividad sísmica con mecanismos focales del tipo cortical y una alta actividad sísmica profunda, que corresponden a sismos de subducción del tipo intraplaca, debido a que en esta zona los sismos presentan focos a profundidades mayores a 70 km. Todos los sismos en la porción oceánica corresponden a la zona de subducción, mientras que en la porción continental se incluyen los sismos de la zona de Benioff, con profundidades focales mayores de 70 Km., y los sismos continentales que son superficiales.

Según el Mapa B.3-5 del Anexo B.3, en el cual se han compilado la información de las Fallas Cuaternarias y Plegamientos del Perú, desarrollado por Macharé et al, (2003) en el marco del Proyecto Internacional de la Litósfera para el estudio de las Principales Fallas Activas en el Mundo, en la zona del proyecto existen lineamientos importantes de sistemas de fallas geológicas. Sin embargo, muchas de estas fallas aún no han sido lo suficientemente estudiadas, no existiendo evidencias de que hayan sido fuentes de actividad sísmica reciente. De las fallas más cercanas a la región de estudio, se ha identificado el sistema de falla San Lorenzo, que es la más cercana a la zona de estudio.

El Mapa B.3-6 del Anexo B.3 muestra un perfil transversal perpendicular a la costa que pasa por entre los puntos evaluados en el presente estudio. En este perfil claramente se observa la zona de contacto de estas placas tectónicas, así como una importante actividad sísmica superficial en la zona de subducción. Se aprecia que en la zona del proyecto existe una alta concentración de movimientos sísmicos superficiales, así mismo los sismos generados en la zona de subducción de interfase se encuentran a distancias mayores a 43 km del área de estudio, y los sismos generados en la zona de subducción de intraplaca se encuentran a una distancia mínima de 110 km. El buzamiento de la placa de Nazca en el corte realizado, que es perpendicular a la costa peruana y que pasa por la zona de estudio, forma un ángulo inicial de 30° entre la fosa y la línea de costa hasta profundidades de 150 km, luego del cual ocurre una nivelación de la pendiente de la zona de contacto de las placas y subduce horizontalmente.

### 6.3.1. Sísmicidad del Área de Influencia

Para la identificación de las fuentes sismogénicas y la caracterización de su actividad, la evaluación del peligro sísmico, además de los estudios geológicos y tectónicos, requiere de una información detallada de la sísmicidad del área de influencia. Esta información, que es obtenida de catálogos de sismos históricos e instrumentales, permite delimitar en forma más precisa la ubicación de las fuentes sismogénicas y la estimación de la frecuencia de ocurrencia de sismos en los últimos cientos de años.

### 6.3.2. Historia Sísmica de la Región en Estudio

Silgado (1969, 1973, 1978 y 1992), hace una recopilación de datos sobre los principales eventos sísmicos ocurridos en el Perú desde el año 1513. Este trabajo constituye una fuente de información básica para el conocimiento de las intensidades sísmicas de los sismos históricos. Según esta información, los mayores terremotos registrados en la costa central del Perú son los de 1586, 1687 y el de 1746, este último destruyó completamente la ciudad de Lima y generó un maremoto con olas de 15 a 20 m de altitud. Así mismo, se reporta que durante el período de 1513 a 1959, Lima fue destruida sucesivamente por un total de 15 terremotos (Silgado, 1978).

Alva Hurtado et al (1984), basándose en esta fuente han elaborado un mapa de Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú. La confección de dicho mapa se ha basado en treinta isosistas de sismos peruanos y datos de intensidades puntuales de sismos históricos y sismos recientes. Las intensidades máximas registradas en la zona costa central, donde se localiza el área de estudio, alcanzan valores de hasta IX en la escala MMI.

En el Anexo B.1 se presenta una descripción resumida de los sismos que han ocurrido en el área de influencia. Este anexo está basado fundamentalmente en el trabajo de Silgado y en el Proyecto SISRA (Sismicidad de la Región Andina), patrocinado por el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS). Así mismo, se incluye la descripción de los sismos recientes ocurridos en la región en estudio y que se consideran significativos para los fines de este estudio.

Del análisis de la información existente se deduce que en la zona andina, para el área de influencia del proyecto, existe poca información histórica. La mayor cantidad de información está referida a sismos ocurridos principalmente a lo largo de la costa centro y sur, debido probablemente a que en esta región se establecieron las ciudades más importantes después del siglo XVI. Se debe indicar que dicha actividad sísmica, tal como se reporta, no es totalmente representativa, ya que pueden haber ocurrido sismos importantes en regiones remotas, que no fueron reportados.

Los sismos más importantes que afectaron la región y cuya historia se conoce son:

- 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 National 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 3 Km de longitud por 1.0 Km de ancho en las zonas de Canchamaná y Tambo de Mora en Chincha.

En el Anexo B.2 se presentan los Mapas de Isosistas disponibles, los cuales corresponden a los siguientes sismos ocurridos en el área en estudio: 9 de Julio de 1586, 20 de Octubre de 1687, 28 de Octubre de 1746, 06 de Enero 1725, 28 de Octubre de 1746, 24 de Mayo de 1940, 28 de Mayo de 1948, 17 de Octubre de 1966, 31 de Mayo de 1970, 3 de Octubre de 1974, 18 de Abril de 1993 y 15 de Agosto del 2007.

Se concluye que, de acuerdo a la historia sísmica del área de estudio, en los últimos 400 años han ocurrido sismos con intensidades de hasta IX.

### 6.3.3. Sismicidad Instrumental en el Área de Influencia

La calidad de la información sísmica instrumental en el Perú mejora ostensiblemente a partir del año 1963 con la instalación de la red sismográfica mundial. En consecuencia, la información consignada en los catálogos sísmicos se agrupa en los siguientes tres períodos de obtención de datos sismológicos:

- Antes de 1900: datos históricos descriptivos de sismos destructores.
- 1900 – 1963: datos instrumentales aproximados.
- 1963 – Actualidad: datos instrumentales precisos.

La información sismológica utilizada en el presente estudio ha sido obtenida del Catálogo Sísmico revisado y actualizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), el cual es una versión revisada del Catálogo Sísmico del Proyecto SISRA - 1982 (Sismicidad de la Región Andina) para el periodo 1471 – 1982, y elaborado por el propio IGP para el periodo 1982 – 2001. Esta información ha sido complementada hasta el 2015 utilizando la información del Catálogo Sísmico del National Earthquake Information Center (NEIC) y del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para lo cual se ha uniformizado las magnitudes utilizadas.

El Mapa B.3-4 presenta la distribución de epicentros en el área de influencia del Proyecto. Este mapa presenta la ubicación de los sismos ocurridos entre los años 1901 y 2015, con magnitudes  $M_w$  mayores o iguales que 3.0. En este Mapa se ubican los sismos con diferentes profundidades focales, tales como sismos superficiales (0-70 km) y sismos intermedios (71-300 km). En el Mapa B.3-6 se presenta un perfil transversal perpendicular a la costa, donde se observa que la sismicidad con foco superficial se localiza principalmente en la zona oceánica en dirección paralela a la línea de costa, donde se producen sismos de magnitud moderada con relativa frecuencia, estos sismos siguen inicialmente una pendiente de  $30^\circ$  aproximadamente. Posterior a ello, a una distancia aproximada de 300 km desde la fosa se torna prácticamente horizontal. Estas características fueron descritas por otros autores (Pomagua, O. 2000; Tavera y Buforn, 1998).

## 6.4. Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico

### 6.4.1. Fundamentos

Como se ha indicado anteriormente, el análisis de peligro sísmico probabilístico consiste en la evaluación de la probabilidad que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual o mayor que un cierto valor fijado. En general, se hace extensivo el término intensidad a cualquier otra característica de un sismo, tal como su magnitud, la aceleración máxima, el valor espectral de la velocidad, el valor espectral del desplazamiento del suelo, el valor medio de la intensidad Mercalli Modificada u otro parámetro de interés para el diseño ingenieril.

La predicción de eventos futuros puede ser realizada por medio de modelos estadísticos, en base a datos pasados. Actualmente el modelo más usado es el de Poisson, aunque algunos investigadores vienen utilizando el modelo de Markov. El modelo de Markov difiere del modelo de Poisson en que las ocurrencias de eventos nuevos dependen de eventos anteriores, mientras que en el modelo de Poisson, estas ocurrencias son independientes de los eventos pasados.

Los resultados obtenidos por medio de estos modelos revelan algunas diferencias. El modelo de Markov, mejor ajustado a la teoría del rebote elástico, tiene ciertas desventajas debido a la dificultad en establecer las condiciones iniciales, requiriendo un tratamiento más numérico. El modelo de Poisson, por otro lado, no siempre está de acuerdo con los datos experimentales para magnitudes sísmicas pequeñas, porque ignora la tendencia de los sismos a agruparse en espacio y tiempo. Sin embargo, el modelo de Poisson ha dado resultados adecuados en muchas situaciones.

El modelo de Poisson asume que los eventos sísmicos son espacial y temporalmente independientes y que la probabilidad de que dos eventos sísmicos ocurran en el mismo sitio y en el mismo instante es cero. Estas suposiciones, por lo general, no se ajustan a la ocurrencia de eventos de baja magnitud, sin embargo representan adecuadamente la ocurrencia de los movimientos grandes, que son los de mayor interés para fines ingenieriles. Por esta razón, el modelo de Poisson es ampliamente utilizado para evaluar el peligro sísmico probabilísticamente.

En su forma más general, la Ley de Poisson es expresada de la siguiente manera:

$$P_n(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}$$

Donde:

- $P_n(t)$  : es la probabilidad de que hayan eventos en un período de tiempo  $t$ ;  
 $n$  : es el número de eventos; y  
 $\lambda$  : es la razón de ocurrencia por unidad de tiempo.

La ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio y la Teoría de las Probabilidades es aplicable en el análisis de la posibilidad de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos: E1, E2,...En, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la probabilidad total, la probabilidad de ocurrencia de A está dada por la siguiente expresión:

$$P(A) = \sum_i^n P(A/E_i) \cdot P(E_i)$$

Donde  $P(A/E_i)$  es la probabilidad condicional que  $A$  ocurra, dado que  $E_i$  ocurra.

La intensidad generalizada ( $I$ ) de un sismo en el lugar fijado puede considerarse dependiente del tamaño del sismo (la magnitud o intensidad epicentral) y de la distancia al lugar de interés. Si el tamaño del sismo ( $S$ ) y su localización ( $R$ ) son considerados como variables aleatorias continuas y definidas por sus funciones de densidad de probabilidad,  $f_S(s)$  y  $f_R(r)$  respectivamente, entonces el peligro sísmico definido por la probabilidad que la intensidad  $I$  sea igual o mayor que una intensidad dada, será:  $P(I \geq i)$  y está dada por:

$$P(I \geq i) = \int \int P[I(s, r)] f_S(s) f_R(r) ds dr$$

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell en 1968, para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo CRISIS 2007 desarrollado por Ordaz et al (1999) en el cálculo del peligro sísmico.

#### 6.4.2. Evaluación y Caracterización de las Fuentes Sismogénicas

La determinación de las fuentes sismogénicas se ha basado en el mapa de distribución de epicentros, así como en las características tectónicas del área de influencia. Como se ha mencionado anteriormente, la actividad sísmica en el Perú es el resultado de la interacción de las Placas de Nazca y Sudamericana, así como del proceso de reajustes tectónicos del aparato andino. Esto permite agrupar a las fuentes en continentales y de subducción.

Las fuentes de subducción modelan la interacción de las Placas Sudamericana y de Nazca. Las fuentes continentales o corticales están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina. La determinación de estas fuentes se basa en conceptos regionales de sismotectónica, pues el aporte de fuentes sismogénicas locales es un problema que continúa abierto, ya que no existen metodologías exactas para darle solución. Un factor principal que imposibilita la evaluación de la contribución de las fuentes locales, es que si bien es cierto que la traza y la geometría de las fuentes pueden ser conocidas, la falta de información de su actividad reciente no admite estudios de recurrencia y en consecuencia, tal actividad no puede incluirse en un modelo probabilístico. Otro factor preponderante es que las ecuaciones de atenuación conocidas son inaplicables para representar la atenuación de las aceleraciones en el campo realmente cercano, correspondiente a la distancia entre la fuente puramente local y el sitio de interés. En consecuencia, el peligro que implican las fuentes locales deberá ser analizado en un estudio de detalle, que evalúe la posibilidad de ruptura superficial de alguna falla que podría afectar al proyecto.

La mayor parte de los sismos ocurridos en el área considerada es producto de la interacción de las placas de Nazca y Sudamericana. La placa de Nazca penetra debajo de la Sudamericana a ángulos variables y se profundiza a medida que avanza hacia el continente. En el Perú la distribución de los sismos en función a la profundidad de sus focos, ha permitido configurar la geometría del proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental.

En el presente estudio se han utilizado siete fuentes sismogénicas de subducción, en las cuales se han diferenciado los mecanismos de interfase (F3, F4 y F5) y de intraplaca superficial (F8, F9 y F10) e intermedias (F12, F13 y F14). Así mismo se han utilizado seis fuentes sísmicas continentales (F15, F16, F17, F18, F19 y F20). Las fuentes sismogénicas de subducción y continentales se presentan en los Mapas B.3-1 y B.3-2, respectivamente. Sus coordenadas geográficas se indican en las Tablas 6.4.2.1 y 6.4.2.2.

#### 6.4.3. Estimación de Parámetros de Sismicidad Local

Para este análisis se ha utilizado el catálogo sísmico para el Perú, que fue compilado utilizando los catálogos del Instituto Geofísico del Perú (IGP), el catálogo del Internacional Seismological Centre (ISC), el catálogo del National Earthquake Information Center (NEIC), el catálogo sísmico del United States Geological Survey (USGS); el catálogo del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), y el catálogo del Global Centroid Moment Tensor (Global CMT) actualizado hasta el año de 2015, entre los meridianos 68° W y 84° W Greenwich y los paralelos 2° N y 22° S y magnitudes de momento  $M_w \geq 4.5$  hasta  $M_w = 8.8$ . El catálogo sísmico fue analizado gráfica y estadísticamente considerando el tiempo, la profundidad y la magnitud de los eventos sísmicos registrados en el área de estudio.

Debido a la gran importancia de tener un parámetro uniforme y homogéneo para comparar el tamaño de los sismos en la evaluación del peligro sísmico, el catálogo compilado fue examinado minuciosamente, homogenizando las magnitudes a Magnitud Momento (MW) y eliminando los eventos registrados con magnitud cero o sin magnitud.

Para convertir magnitudes de diferentes escalas a MW, las siguientes relaciones fueron utilizadas:

- Para eventos con magnitudes  $m_b$  (ondas de cuerpo) reportadas,  $M_S$  es calculado usando las expresiones dadas por el GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program):

$$M_S = 1.644 m_b - 3.753 \quad m_b < 5.9$$
$$M_S = 2.763 m_b - 10.301 \quad m_b \geq 5.9$$

**Tabla 6.4.2.1. Coordenadas geográficas de las Fuentes de Subducción**

FUENTE	MECANISMO FOCAL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		
		Longitud (S)	Latitud (W)	Profundidad (km)
Fuente F3	Interfase	-81.050	-8.931	30.0
		-77.028	-14.811	30.0
		-75.998	-13.999	75.0
		-79.156	-7.834	75.0
Fuente F4	Interfase	-77.028	-14.811	30.0
		-75.684	-16.501	30.0
		-74.063	-17.768	30.0
		-72.914	-16.397	75.0
Fuente F5	Interfase	-75.998	-13.999	75.0
		-74.063	-17.768	30.0
		-72.914	-16.397	60.0
		-71.427	-17.553	60.0
		-69.641	-18.721	70.0
		-69.627	-22.000	70.0
Fuente F8	Intraplaca superficial	-71.586	-22.000	30.0
		-71.617	-19.680	30.0
		-79.156	-7.834	80.0
		-75.998	-13.999	80.0
Fuente F9	Intraplaca superficial	-74.996	-13.218	115.0
		-78.427	-7.363	100.0
		-75.998	-13.999	80.0
		-72.914	-16.397	80.0
Fuente F10	Intraplaca superficial	-72.160	-15.453	130.0
		-74.996	-13.218	110.0
		-72.914	-16.397	95.0
		-70.892	-13.863	245.0
		-69.055	-15.365	275.0
		-68.013	-19.959	200.0
		-67.868	-22.000	165.0
Fuente F12	Intraplaca intermedia	-69.627	-22.000	100.0
		-69.641	-18.721	100.0
		-71.427	-17.553	110.0
		-78.427	-7.363	100.0
Fuente F13	Intraplaca intermedia	-74.996	-13.218	115.0
		-73.973	-12.421	135.0
		-77.177	-6.557	140.0
Fuente F14	Intraplaca intermedia	-74.996	-13.218	110.0
		-72.160	-15.453	130.0
		-70.892	-13.863	130.0
		-73.577	-12.112	110.0
		-77.177	-6.557	145.0
		-75.600	-5.539	145.0
Fuente F14	Intraplaca intermedia	-74.400	-6.567	155.0
		-73.589	-8.086	195.0
		-73.914	-9.347	170.0
		-72.963	-11.633	145.0
		-73.973	-12.421	140.0

**Tabla 6.4.2.2. Coordenadas geográficas de las Fuentes Continentales**

FUENTE	MECANISMO FOCAL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		
		Longitud (W)	Latitud (S)	Profundidad (km)
Fuente F15	Cortical	-79.156	-7.834	25.0
		-78.084	-7.213	40.0
		-76.340	-10.670	40.0
		-74.760	-13.130	40.0
		-75.998	-13.999	25.0
Fuente F16	Cortical	-75.998	-13.999	25.0
		-74.760	-13.130	50.0
		-70.176	-15.201	50.0
		-70.434	-15.947	50.0
		-69.134	-17.789	50.0
		-69.641	-18.721	25.0
Fuente F17	Cortical	-71.427	-17.553	25.0
		-78.100	0.748	25.0
		-76.872	0.373	40.0
		-77.410	-0.867	60.0
		-76.826	-4.705	60.0
		-79.100	-5.200	25.0
Fuente F18	Cortical	-79.085	-0.370	25.0
		-79.100	-5.200	35.0
		-75.100	-4.330	35.0
		-74.422	-7.976	50.0
Fuente F19	Cortical	-77.143	-9.079	50.0
		-77.143	-9.079	35.0
		-74.422	-7.976	35.0
		-74.170	-9.330	35.0
		-72.480	-11.400	40.0
		-74.760	-13.130	40.0
Fuente F20	Cortical	-76.340	-10.670	35.0
		-74.760	-13.130	40.0
		-72.480	-11.400	40.0
		-69.400	-12.966	40.0
		-70.176	-15.201	40.0

- Para eventos con magnitudes  $M_S$  (ondas superficiales) reportadas u obtenidas,  $M_W$  es calculado usando las expresiones dadas por el ISC (International Seismological Center; Scordilis, 2006):

$$M_W = 0.67 (\pm 0.005) M_S + 2.07 (\pm 0.03) \quad 3.0 \leq M_S \leq 6.1$$

$$M_W = 0.99 (\pm 0.02) M_S + 0.08 (\pm 0.13) \quad 6.2 \leq M_S \leq 8.2$$

Definidas las fuentes sismogénicas, se dividió el catálogo sísmico en función al número de fuentes sismogénicas, determinándose de esta manera los eventos delimitados en cada fuente. Dado que el proceso de

Poisson postula la utilización de datos mutuamente independientes, se procedió a eliminar los eventos sísmicos catalogados como réplicas y los eventos antecesores al evento principal. Catálogo Sísmico generado para este estudio fue actualizado hasta el 2015 y depurado empleando el programa ZMAP (Wiemer, 1996) versión 6.0, bajo la metodología de depuración propuesta por Reasenberg (1985).

La caracterización de las fuentes sismogénicas fue realizada a través del cálculo de sus parámetros sismológicos, asumiendo el modelo exponencial no truncado de Gutenberg y Richter. La magnitud máxima creíble fue definida tomando en consideración los valores máximos reportados por la información histórica.

Para el cálculo de la tasa, se ha determinado los periodos de completitud del catálogo sísmico por rangos de magnitudes. Así, se ha encontrado que el catálogo sísmico es completo para los sismos de magnitudes entre Mw 4 a Mw 5, a partir de 1965; para los sismos de Mw 5 a Mw 6, el catálogo es completo a partir de 1960; para los sismos de Mw 6 a Mw 7, el catálogo es completo a partir de 1950; para los sismos de Mw 7 a Mw 8, el catálogo es completo a partir de 1910 y para los sismos mayores a Mw 8 el catálogo es completo a partir de 1580.

Los parámetros de recurrencia sísmica, para diferentes periodos de observación y diferentes magnitudes, se obtuvieron con el método propuesto por Weichert (1980). La metodología se basa en la estimación de la máxima probabilidad de los parámetros  $N_0$  y  $\beta$ , de la relación  $\text{Log}(N) = N_0 \exp(-\beta m)$ , ésta es extendida al caso de un grupo de eventos de magnitud con diferentes periodos de observación.

El periodo de observación es independientemente determinado (Stepp, 1972). El máximo sismo regional debe ser independientemente estimado de las consideraciones geofísicas, como una máxima longitud de falla o un sismo histórico. Si escogemos arbitrariamente una ley de recurrencia y la truncamos, la probabilidad de que un sismo, teniendo una magnitud entre  $m$  y  $m+dm$  es:

$$p(m)dm = \text{const.} \beta e^{-\beta m} dm m_0 \leq m \leq m_x$$

Integrando bajo los intervalos de magnitud, nos lleva a la función de probabilidad  $L$ , para  $n_i$  eventos, de magnitud clase  $m_i$ :

$$L(\beta | n_i, m_i, t_i) = \frac{N!}{\prod_i n_i!} \prod_i p_i^{n_i}$$

Donde:

$$p_i = \frac{t_i \exp(-\beta m_i)}{t_j \exp(-\beta m_j)}$$

Los máximos o mínimos de  $\ln(N)$  son obtenidos de:

$$\frac{\sum_i t_i m_i \exp(-\beta m_i)}{\sum_j t_j \exp(-\beta m_j)} = \frac{\sum n_i m_i}{N} = \bar{m}$$

Donde, el valor de  $\beta$  se halla por métodos iterativos.

La siguiente ecuación determina la tasa; está definida como el número de sismos por tiempo. Para diferentes periodos de tiempos, la tasa es

$$N_a = N \sum_i \exp(-\beta m_i) / \sum_j t_j \exp(-\beta m_j)$$

Nota: Para idénticos periodos de tiempo ( $t_i$ ) la tasa está dada por  $N/t$ .

En la Tabla 6.4.3.1 se presentan los parámetros de sismicidad local de las fuentes sísmicas.

**Tabla 6.4.3.1.** Parámetros de sismicidad local utilizados

FUENTE	Mw			
	Mmin	Mmax	BETA	TASA
F3	4.3	8.6	1.5957	14.0302
F4	4.3	8.5	1.544	9.7881
F5	4.2	8.8	1.3305	9.5505
F8	4.2	7.7	1.4477	3.7718
F9	4.4	7.5	1.575	4.5766
F10	5.0	8.0	2.3454	13.0837
F12	4.2	8.5	1.6555	3.2898
F13	4.3	7.0	1.3216	3.4012
F14	4.7	7.8	2.0615	5.4152
F 15	4.0	7.3	0.6913	0.8147
F 16	4.2	7.6	1.2578	2.3338
F 17	4.2	7.0	1.0968	2.2363
F 18	4.7	7.2	1.5437	1.6851
F 19	4.2	7.1	1.2353	2.5516
F 20	4.4	6.9	0.5029	0.5084

#### 6.4.4. Atenuación de las Ondas Sísmicas

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber que intensidad se presentará en el lugar de interés, si en la  $i$ -ésima fuente ocurriera un sismo con magnitud dada.

Las leyes de atenuación pueden adoptar muy diversas formas, para estimar el peligro sísmico en el presente estudio se han utilizado las leyes de atenuación para ordenadas espectrales de Youngs et al (1997), CISMID (2006) y Zhao et al (2006) que diferencian los mecanismos focales para sismos de subducción de interfase e intraplaca en la estimación de la máxima aceleración del suelo. Del mismo modo, se ha utilizado el modelo de atenuación sísmica propuesto por Sadigh et al (1997) para sismos continentales.

**Tabla 6.4.4.1:** Clasificación del Sitio (Fuente IBC, 2012)

TIPO DE SUELO	NOMBRE DE SUELO	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS 30 PRIMEROS METROS (TABLA 20.3-1 SITE CLASSIFICATION ASCE/SEI 7-05)		
		Velocidad de onda de corte, $\bar{v}_s$ (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, $\bar{N}$	Resistencia al corte no drenada, $\bar{s}_u$ (psf)
A	Roca muy dura	$\bar{v}_s > 1,500$	N/A	N/A
B	Roca	$760 < \bar{v}_s \leq 1,500$	N/A	N/A
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < \bar{v}_s \leq 760$	$\bar{N} > 50$	$\bar{s}_u \geq 2,000$
D	Suelo rígido	$180 \leq \bar{v}_s \leq 360$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$1,000 \leq \bar{s}_u \leq 2,000$
E	Suelo blando	$\bar{v}_s < 180$	$\bar{N} < 15$	$\bar{s}_u < 1,000$
E	-	Cualquier perfil de suelo con más de 3 m de espesor que tenga las siguientes características: 1. Índice de plasticidad (IP) > 20 2. Contenido de humedad (w) $\geq 40\%$ y 3. Resistencia al corte no drenada $\bar{s}_u < 500$ psf		
F	-	Cualquier perfil de suelo que contenga una o más de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables a una posible fractura o colapso bajo efecto sísmico, por ejemplo: suelos licuables, arcillas altamente sensibles y suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas (H >3 m de turba y/o arcillas altamente orgánicas, donde H = espesor del suelo) 3. Arcillas de muy alta plasticidad (H >7.6 m con índice de plasticidad IP > 75) 4. Arcillas gruesas suaves a medias (H >36 m)		

Nota: 1 libra por pie cuadrado (psf) = 0.0479 kPa. N/A = No aplicable

Los resultados obtenidos en el presente análisis de peligro sísmico para la zona de estudio son aquellos valores de aceleraciones sobre suelo tipo B

(roca) y tipo C (suelo muy denso o roca blanda) cuya clasificación de sitio ha sido caracterizada de acuerdo al código IBC (International Building Code, 2012) y a las estandarizaciones de la ASCE SEI 7-10 (American Society of Civil Engineers, 2010).

La velocidad promedio de ondas de corte  $\bar{v}_s$  de acuerdo al código IBC y a los estándares de la ASCE, se determina de la siguiente manera:

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

$d_i$  : Espesor de cada capa entre 0.0 m y 30.0 m

$v_{si}$  : Velocidad de ondas de corte de cada capa (m/s)

De acuerdo a la Tabla 6.4.4.1, se considera una clasificación Tipo B (roca) para velocidades promedio de ondas de corte  $V_s$  entre 760 m/s y 1500 m/s; y suelo Tipo C (suelo muy denso a roca blanda), velocidades promedio de ondas de corte  $V_s$  entre 360 m/s y 760 m/s.

Con el propósito de obtener un espectro promedio que tome el efecto de las leyes empleadas en cada tipo de suelo, se llevó a cabo una ponderación de los resultados individuales de cada ley. El valor de ponderación tomó en cuenta factores como la información disponible, similitud de las características de las leyes de atenuación con el área del proyecto, rango de resultados similares, etc.

El valor de cada ponderación realizada a cada ley de atenuación se muestra en la Tabla 6.4.4.2.

**Tabla 6.4.4.2:** Relación de Ponderación de Leyes de Atenuación

Suelo Tipo B	Ponderación
Youngs et al (1997)	0.40
Zhao et al (2006)	0.60
Suelo Tipo C	Ponderación
CISMID (2006)	0.50
Zhao et al (2006)	0.50

De esta forma se obtendrán los espectros ponderados con valores de aceleración para la condición de suelo tipo B (roca) y tipo C (suelo muy denso).

#### 6.4.5. Determinación del Peligro Sísmico

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, el peligro sísmico puede calcularse considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas analizadas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se ubica la zona de estudio.

El peligro sísmico del área del proyecto se ha determinado utilizando la información pertinente en la literatura técnica y así como el programa de cómputo CRISIS 2007, versión 7.2 desarrollado por Ordaz et al. (1999), que emplea métodos numéricos conocidos.

El peligro expresado en términos de las tasas de excedencia de intensidades  $S_a$ , se calcula mediante la siguiente expresión (Esteva, 1970):

$$v(S_a / R_0, p) = \sum_{n=1}^{n=N} \int_{M_o}^{M_u} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > sa / M, R_0) dM$$

Donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas  $N$ , y  $\Pr(A > sa / M, R)$ , es la probabilidad que la intensidad exceda cierto valor, dadas la magnitud del sismo  $M$ , y la distancia entre la  $i$ -ésima fuente y el sitio  $R$ . Las funciones  $\lambda(M)$  son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas, la cual fue descrita anteriormente. La integral se realiza desde  $M_o$  hasta  $M_u$ , lo cual indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

Se hace notar que la ecuación expresa, sería exacta si las fuentes sísmicas fueran puntos. En realidad son volúmenes, por lo que los epicentros no sólo pueden ocurrir en los centros de las fuentes, sino, con igual probabilidad en cualquier punto dentro del volumen correspondiente. Al calcular se debe tomar en cuenta esta situación, subdividiendo las fuentes sísmicas en diversas formas geométricas, en cuyo centro de gravedad se considera concentrada la sismicidad de la fuente. En vista que se supone que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad tiene una distribución lognormal, la probabilidad  $\Pr(A > sa / M, R_i)$  se calcula de la siguiente manera:

$$\Pr(A > sa / M, R_o) = 1 - \phi \left[ \frac{1}{\sigma_{Lnsa}} \ln \frac{sa}{med(A / M, R_i) sa} \right]$$

Siendo  $\phi[\cdot]$ , la distribución normal estándar,  $med(A / M, R_i)$ , representa la mediana de la intensidad, determinado por la ley de atenuación correspondiente, y  $\sigma_{Lnsa}$  representa la desviación estándar del logaritmo natural de  $sa$ .

La ecuación descrita, incluye tanto la ley de atenuación, como las incertidumbres en ella, sin embargo para la zona sismogénica, los parámetros  $p$  que definen la curva de tasas de excedencia de la magnitud, no son deterministas. Por lo tanto, para calcular la tasa de excedencia no condicionada,  $v(sa)$ , procede calcular el valor esperado con respecto a las variables inciertas, por lo que la expresión del cálculo de la tasa de excedencia de la aceleración es:

$$v(a) = \int v(sa/p) P_p(P) dp$$

Donde  $P_p(P)$  es la densidad conjunta de probabilidades de los parámetros que definen a  $\lambda(M)$ . La ecuación proporciona la contribución de una fuente, y cuando se consideran varias fuentes basta sumar las contribuciones de todas las fuentes sísmicas, para obtener la tasa de excedencia total. El peligro sísmico se expresa, entonces en términos de la tasa de excedencia de valores dados de intensidad sísmica. Como se ha indicado al inicio de este capítulo la intensidad sísmica determinada de esta manera se denomina espectros de peligro uniforme.

Para la evaluación del peligro sísmico mediante leyes de atenuación para aceleraciones espectrales en la zona de estudio, se ha considerado las coordenadas geográficas (Datum WGS84) presentadas en la Tabla 6.4.5.1.

**Tabla 6.4.5.1.** Coordenadas Geográficas consideradas para el área de estudio.

ZONA EN ESTUDIO	COORDENADAS	
	Longitud (W)	Latitud (S)
Distrito de Cieneguilla	-76.81	-12.12

En el presente estudio se utilizó las fuentes de subducción F3, F4 y F5, asumiendo que estas fuentes presentan mecanismos focales del tipo compresivo, o de falla inversa, los cuales corresponden a sismos de subducción de interfase. Así mismo, se utilizó las fuentes de subducción de intraplaca superficial F8, F9 y F10, e intraplaca intermedia, F12, F13 y F14, asumiendo que estas fuentes presentan mecanismos focales del tipo tensional, o de falla normal. Por su parte, para las fuentes continentales fueron consideradas para el análisis, las fuentes F15, F16, F17, F18, F19 y F20.

La Tabla 6.4.5.2 muestra los resultados obtenidos con el programa CRISIS 2007 versión 7.6 correspondiente a las máximas aceleraciones horizontales esperadas en el punto de análisis para diversos tipos de suelos. Estos valores se han estimado para los diferentes modelos de

atenuación utilizados y para los períodos de retorno de 475, 1000 y 2500 años, considerando 50 años de periodo de exposición sísmica.

**Tabla 6.4.5.2:** Aceleraciones espectrales para  $T = 0.0$  s para diferentes periodos de retorno.

Modelo de Atenuación Ponderado	Longitud (W)	Latitud (S)	Aceleración horizontal Máxima (cm/s <sup>2</sup> ) de diferentes Modelos de atenuación para un periodo de retorno de:					
			50	100	200	475	1000	2500
Roca (Tipo B)	-76.81	-12.12	156.40	216.06	284.16	387.51	492.73	633.46
Suelo (Tipo C)	-76.81	-12.12	168.41	236.99	323.71	462.27	603.11	822.50

Modelo de Atenuación Ponderado	Longitud (W)	Latitud (S)	Aceleración horizontal Máxima (g) de diferentes Modelos de atenuación para un periodo de retorno de:					
			50	100	200	475	1000	2500
Roca (Tipo B)	-76.81	-12.12	0.16	0.22	0.29	0.40	0.50	0.65
Suelo (Tipo C)	-76.81	-12.12	0.17	0.24	0.33	0.47	0.61	0.84

Dependiendo del tipo de estructura, la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente de edificaciones, define el coeficiente sísmico de diseño a aquel obtenido con un 10% de probabilidad de excedencia y un periodo de exposición sísmica de 50 años, el cual corresponde a un evento sísmico de 475 años de periodo de retorno.

Lo anterior significa que en la zona evaluada, la aceleración horizontal máxima del sismo de diseño para un suelo del Tipo B (roca) corresponde a 387.51 cm/s<sup>2</sup> considerando la media (P.50) del modelo de atenuación ponderado, y así mismo, se propone valores de aceleración horizontal máxima de 462.27 cm/s<sup>2</sup> para suelo tipo C (suelo muy denso).

## 6.5. Resultados

Según la información neotectónica de la zona de estudio, se puede concluir que, aparte de la actividad sísmica superficial producto de la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana, no hay evidencias documentadas de ocurrencia de eventos sísmicos relacionados a sistemas de fallas activas. Sin embargo, esta información muestra que la fuente de subducción superficial puede generar fuertes sismos de magnitudes de hasta 8.8 Mw en esta región.

La sismicidad histórica indica que en la región en estudio se han producido eventos sísmicos con intensidades de hasta grado IX en la escala Mercalli

Modificada (MMI) en la zona andina producto de la actividad sísmica de subducción y continental.

La distribución espacial de los sismos instrumentales indica una mayor actividad sísmica de la zona de subducción en la costa. El buzamiento de la placa de Nazca en el corte realizado, que es perpendicular a la costa peruana y que pasa por la zona de estudio, forma un ángulo inicial de  $30^{\circ}$  entre la fosa y la línea de costa hasta profundidades de 150 km, luego del cual ocurre una nivelación de la pendiente de la zona de contacto de las placas y subduce horizontalmente. En la zona continental existe también actividad sísmica superficial generada en muchos de los casos por sistemas de fallas activas.

En el análisis probabilístico de peligro sísmico se ha considerado las fuentes sismogénicas como volúmenes, habiéndose definido éstas en función a su mecanismo focal como fuentes de interfase, fuentes de intraplaca superficial e intraplaca intermedia, siguiendo la configuración de buzamiento propuesto por Cahill e Isacks (1992). Los parámetros de sismicidad de cada una de estas fuentes han sido evaluados utilizando el ajuste de curva de máxima probabilidad y el patrón de atenuación de las ondas sísmicas ha sido modelado utilizando las leyes de atenuación de Youngs et al (1997), CISMID (2006), Zhao et al (2006) y Sadigh et al (1997), este último propuesto para sismos continentales.

En base a los resultados expuestos se propone un valor de aceleración horizontal máxima de diseño PGA de  $387.51 \text{ cm/s}^2$  para roca suelo Tipo B, y un valor de aceleración horizontal máxima de diseño PGA de  $462.27 \text{ cm/s}^2$  para suelo Tipo C. En el caso de considerar la influencia de la componente vertical del movimiento sísmico, de acuerdo a la norma de diseño sismorresistente E-030, ésta deberá ser estimada como los  $2/3$  del valor de la aceleración horizontal máxima de diseño (PGA).

Los resultados obtenidos son aplicables sólo y exclusivamente para la zona de estudio.

## 7. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA

### 7.1. Recopilación de Información Geotécnica

Se ha recopilado información geotécnica proveniente de diversos proyectos realizados por la empresa privada Corporación Olam S.A.C, de estos, el estudio denominado "Anteproyecto de Obras Generales y Secundarias de Agua Portable y Alcantarillado de Tambo Viejo y Anexos", ha sido el que ha aportado la mayor cantidad información para el presente trabajo.

La información recopilada permitió tener un conocimiento previo de las condiciones geotécnicas del lugar, lo cual facilitó la planificación de los trabajos de exploración. Se recopilaron en total 67 registros de calicatas. los datos de estos sondeos (código, coordenadas, profundidad, nivel freático, etc.) se

muestran en la Tabla 1 del Anexo C.1, mientras que, el registro de los mismos en el Anexo C.2.

## 7.2. Exploración Geotécnica

El programa de exploración de campo se realizó en febrero del 2020. Los trabajos consistieron en la ejecución de calicatas, ensayos de densidad in situ y ensayos de Penetración Dinámica Ligera (DPL). Los sondajes ejecutados fueron estratégicamente distribuidos con el objetivo de complementar y corroborar la información provista por los estudios recopilados. De cada calicata ejecutada se extrajeron muestras de suelos y se describió el material mediante una inspección visual. En el caso de los ensayos DPL, se registró el valor resistencia a la penetración (n).

Las muestras extraídas fueron ensayadas convenientemente en laboratorios reconocidos, esto permitió caracterizar mecánicamente el suelo y evaluar la cantidad de agentes químicos nocivos para la cimentación presentes en él.

Los registros de los sondajes ejecutados se presentan en el Anexo C.3, su panel fotográfico en el Anexo C.4 y la ubicación de los mismos, junto con los sondajes recopilados, en el Mapa C.23-1.

### 7.2.1. Calicatas Ejecutadas

Se ejecutaron en total 37 calicatas, las cuales contaron con una profundidad de hasta 3.00 m. Estas excavaciones se realizaron de forma manual, con personal calificado y siguiendo todos los protocolos de seguridad establecidos para este tipo de trabajos. Los datos de las calicatas ejecutadas (código, coordenadas, profundidad y nivel freático) se muestran en la Tabla 2 del Anexo C.1.



**Figura 7.1.** Excavación de calicata C-21 en el distrito de Cieneguilla

En cada una de las calicatas excavadas se procedió con muestreo de los diferentes tipos de suelos encontrados, esto se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM D4220, la cual proporciona métodos para la investigación y muestreo de suelos y rocas. A su vez, la descripción del tipo de material encontrado en cada calicata fue realizada según lo establecido en la norma ASTM D2488, la cual describe un procedimiento para la identificación y la descripción de suelos con propósitos ingenieriles.

### 7.2.2. Ensayos de Penetración Ligera

Este ensayo permite obtener un registro continuo de la resistencia a la penetración ( $n$ ) de los suelos. El ensayo consiste en el hincado continuo de una punta cónica de  $60^\circ$ , utilizando la energía de un martillo de 10 Kg el cual cae libremente desde una altura de 0.50 m. Se registra el número de golpes necesarios para que la punta sea introducida 0.10 m en el terreno (NTP 339.159), en total se han ejecutado 02 ensayos DPL alcanzando una profundidad de 2.50 m. (Figura 7.2)



**Figura 7.2.** Ensayo de Penetración Ligera en el distrito de Cieneguilla

El valor de la penetración de este ensayo ( $n$ ) puede ser correlacionado con el del SPT ( $N$ ), de esta manera se puede determinar el grado de compacidad y/o consistencia de los suelos. Los datos de los ensayos DPL ejecutados (código, coordenadas, y profundidad) se muestran en la Tabla 3 del Anexo C-1.

### 7.2.3. Ensayos de Densidad del Campo por el Método del Cono de Arena

Este ensayo consiste en excavar un orificio (de diámetro conocido) en el terreno. Posteriormente, el orificio excavado es llenado con arena calibrada, cuya densidad se conoce. Luego, se procede a calcular el peso de la arena utilizada para llenar completamente el orificio y, dado que se conoce la densidad de la arena, se obtiene el volumen del orificio el cual es equivalente al volumen del material de suelo extraído. Finalmente, se pesa el material de suelo extraído. La densidad natural del suelo se determina dividiendo el peso del material extraído entre el volumen del orificio, Figura 7.3.

En el presente estudio se ejecutaron, dentro de las calicatas, un total de 06 ensayos de densidad de campo por el método del cono de arena (ASTM D1556), la profundidad a la cual se efectuó estos ensayos varió entre 1.0 a 1.90 metros.



**Figura 7.3.** Ensayo de Densidad de Campo por el Método del Cono de Arena (DC-05) en la calicata C-26.

La Tabla 4 del Anexo C.1, muestra información pertinente sobre la calicata en la que fue ejecutado cada ensayo de densidad, la profundidad a la cual fue realizada y los resultados de la densidad natural obtenidos.

### 7.3. Ensayos de Laboratorio

La Norma Técnica de Edificación E.050 Suelos y Cimentaciones establece como requisito para los estudios de mecánicas de suelos con fines de cimentaciones, que las muestras de suelos obtenidas de la exploración de campo sean analizadas en laboratorio mediante ensayos de mecánica de suelos y análisis basados en ensayos químicos con el fin de asegurar la estabilidad y permanencia de las edificaciones (Normas Legales, 2006). A continuación se describe los ensayos de laboratorio que se realizaron para el área de estudio.

### 7.3.1. Ensayos de Mecánica de Suelos

Las muestras de suelo obtenidas de las calicatas fueron analizadas mediante ensayos estándares y especiales, en el Laboratorio Geotécnico del CISMID de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los ensayos de clasificación de suelo fueron llevados a cabo en muestras alteradas, extraídas durante la exploración de campo, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Los ensayos estándar de mecánica de suelos realizados en este estudio fueron los siguientes:

- |   |                            |             |
|---|----------------------------|-------------|
| - | Análisis granulométrico    | ASTM D 422  |
| - | Límites líquido y plástico | ASTM D 4318 |
| - | Contenido de humedad       | ASTM D 2216 |

Del mismo modo, se realizó los siguientes ensayos especiales:

- |   |                        |             |
|---|------------------------|-------------|
| - | Compresión Triaxial CD | ASTM D 2850 |
| - | Corte Directo          | ASTM D3080  |

Los certificados de laboratorio de los ensayos de Mecánica de Suelos se presentan en el Anexo C.5 y un resumen de los mismos en las Tablas 5, 6 y 7 del Anexo C.1.

### 7.3.2. Análisis Basado en Ensayo Químico

Los ensayos químicos se realizaron con la finalidad de cuantificar la cantidad de elementos nocivos, para el concreto y acero de la cimentación, que se encuentran presentes en el suelo. Para esto se seleccionaron 06 muestras, del total de las obtenidas en las calicatas, y fueron ensayadas en el Laboratorio Químico de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- |   |                        |             |
|---|------------------------|-------------|
| - | Contenido de Sulfatos  | ASTM E 275  |
| - | Contenido de Cloruros  | ASTM D 3370 |
| - | Sales Solubles Totales | ASTM D 1888 |
| - | Potencial de Hidrógeno | ASTM D 4792 |

Los certificados de laboratorio de los ensayos químicos se presentan en el Anexo C.5 y un resumen de los mismos en la Tabla 8 del Anexo C.1.

## 7.4. Perfiles Estratigráficos

Los perfiles estratigráficos, han sido desarrollados para las secciones representativas A-A', B-B' y C-C', las cuales cubren parte de la zona de estudio. Dichas secciones y sus ubicaciones se muestran en el Anexo C.6.

**Perfil de Suelos – Sección A-A'**, Sección que muestra el corte transversal que va en dirección S65°E dentro del área de estudio, desde la calle San Martín hasta las proximidades del río Lurín (a lo largo de la quebrada Tambo Viejo) e incluye los siguientes sondajes: C-06, CR-14, CR-44, C-43, C-09, CR-07 y C-22. El perfil muestra un estrato superficial conformado por relleno antrópico, cuyo espesor varía entre 0.00 y 0.70 m; en la zona intermedia, se tienen estratos de arenas (SW-SM) de compacidad media a densa hasta los 2.00 m de profundidad; finalmente, subyaciendo a todos estos materiales, se tiene la presencia de depósitos gravas (GP, GW) de compacidad densa.

**Perfil de Suelos – Sección B-B'**, Sección que muestra el corte transversal, que va en dirección N63°E, desde la calle Algodonal hasta la calle 16 aproximadamente, e incluye a los sondajes: CR-04, C-35, C-25 y C-36. El perfil muestra un estrato superficial conformado por relleno antrópico, cuyo espesor varía entre 0.00 y 0.40 m; continuando, se tienen estratos de arenas (SP, SM, SC) de compacidad media o arcillas (CL) de consistencia media, de hasta 3.00 m de espesor; solo en la parte central del perfil, se observa la presencia de grava (GP), la cual se encuentra subyaciendo a los materiales anteriormente mencionados.

#### **Perfil de Suelos – Sección C-C'**

Sección que muestra el corte transversal, que va en dirección N32°E, desde un sector próximo a la avenida Luis Felipe de las Casas hasta la calle Manco Cápac aproximadamente, e incluye a los sondajes: C-12, C-10, C-08, CR-26 y CR-05. El perfil muestra un estrato superficial conformado por relleno antrópico, que varía entre 0.00 y 0.90 m de espesor; subyaciendo a estos rellenos, en la zona donde inicia el perfil, se tienen depósitos de arena (SM) de compacidad media a densa de más de 3.00 m de profundidad, mientras que en la parte restante del perfil, se presentan estratos de limos y arcillas (ML-CL) de consistencia media hasta los 1.50 m de profundidad, encontrándose estos últimos, sobreyaciendo a los depósitos de grava (GP-GW) de compacidad densa cuya potencia es mayor a los 3.00 m.

### **7.5. Agresión Química al Concreto de la Cimentación**

La agresión química ocasionada por el suelo, bajo el cual se cimienta una estructura, es causada por la cantidad de cloruros, sulfatos y el valor del potencial de hidrogeno (PH) presentes en él. Las sales solubles también juegan un papel importante, debido a que, podrían causar pérdida de resistencia mecánica por problemas de lixiviación.

La información expuesta en la Tabla 9 del Anexo C.1, corresponde a los límites de concentración recomendados por parte del ACI para el caso de los sulfatos y cloruros, y a la experiencia existente en el caso de las sales solubles.

Como se mencionó, se realizaron ensayos químicos a 06 muestras de suelo, el criterio de elección de estas muestras fue tratar de cubrir, de forma representativa, la totalidad del área de estudio.

Los resultados de los ensayos de laboratorio muestran que los puntos estudiados presentan una concentración de sulfatos que varía entre 548 y 3037 ppm, lo que indica que la acción química sobre el concreto de cimentación será de leve a severa dependiendo de la zona de análisis. Así, en las inmediaciones de las calicatas C-21, se presentará una acción química severa, mientras que, en las inmediaciones de las calicatas C-33 y C-37, la acción química será moderada.

Las concentraciones de los cloruros están entre 45 a 181 ppm, lo que indica que la acción química sobre los elementos de refuerzo de la cimentación no será perjudicial.

La concentración de sales soluble totales varía entre 741 y 3386 ppm, lo cual indica que en los puntos estudiados no se presentará problemas de pérdida de resistencia mecánica por problemas de lixiviación.

Finalmente, se evidenció un valor de PH mayor a 7.38, lo cual indica que los suelos del área de estudio son ligeramente ácidos. Considerando que la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones indica que por debajo de un valor de PH de 4, se debe proponer medidas de protección adecuadas contra el ataque ácido, en las inmediaciones de los puntos estudiados no es necesario proponer medidas de protección especial ante esta condición.

## 7.6. Recopilación de Información Geofísica

Se ha recopilado información de 11 mediciones puntuales de microtemores ejecutadas en el marco del “Programa Presupuestal: 0068: Reducción de Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres. Producto: 3000562: Municipios Promueven la Adecuada Ocupación y Uso del Territorio Frente al Riesgo de Desastres. Informe: Microzonificación Sísmica del Distrito de Pachacámac” desarrollado por el CISMID en el año 2018. En la Tabla 1 del Anexo C.7 y en el Anexo C.8, se muestran los periodos y los cocientes espectrales entre la componente horizontal resultante y la vertical.

Adicionalmente, y del mismo estudio antes mencionado, se ha recopilado la información de 04 perfiles de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y de compresión ( $V_p$ ) obtenidos con los métodos MASW y de refracción sísmica, respectivamente. Las Tablas 2 y 4 del Anexo C.7 presentan información concerniente a dichos sondajes, tales como sus códigos de identificación para el presente estudio, coordenadas UTM, entre otros datos. A su vez, los resultados de los 04 perfiles, así como su correspondiente tabla resumen, son presentados en el Anexo C.9 y en la Tabla 3 y en el Anexo C.10 y Tabla 5, para las velocidades de ondas de corte y de compresión, respectivamente. Finalmente, la

ubicación de los perfiles sísmicos se muestra en el Mapa C.23-3 del presente tomo.

## 7.7. Exploración Geofísica

La exploración geofísica involucra una serie de procedimientos de investigación indirecta del suelo, cuyo objetivo es el de complementar la exploración geotécnica para así poder estimar el perfil sísmico del suelo. Los resultados que se obtienen de este tipo de exploración son tanto el período de vibración, así como sus correspondientes perfiles de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) y de compresión ( $V_p$ ).

En el presente trabajo, para la determinación del período de vibración del suelo se realizó el ensayo de medición puntual de microtremores (43 puntos). Adicionalmente, para la estimación de perfiles de velocidades de ondas de corte, se realizaron ensayos MASW (22 líneas) y arreglos de microtremores (01). Finalmente, para la determinación de perfiles de velocidades de ondas de compresión se realizaron ensayos de refracción sísmica (17 líneas).

La distribución espacial de los puntos de exploración geofísica ejecutados en este estudio se ha realizado tomando en consideración la información recopilada descrita en la Sección 7.6., y se puede observar a detalle en los Mapas C.23-2 y C23-3.

### 7.7.1. Ensayo de Medición Puntual de Microtremores

El período de vibración es un parámetro dinámico que define el comportamiento del suelo durante un evento sísmico o terremoto. En la actualidad, este parámetro es normalmente obtenido de las mediciones puntuales de microtremores.

Los microtremores son conocidos como microsismos, ruido sísmico de fondo, campo natural, vibración o ruido ambiental, oscilaciones omnipresentes o microtemblores (Flores, 2004). Lermo y Chávez-García (1994) los definen como vibración o ruido ambiental. Estas vibraciones están conformadas básicamente por ondas superficiales Rayleigh y Love que están afectadas por la estructura geológica del sitio donde se miden (Bard, 1998).

Los microtremores han sido utilizados desde principios del siglo XX para estimar las propiedades dinámicas del terreno. Omori (1908) inició las investigaciones sobre microtremores empleando un instrumento muy simple para observar la vibración natural del suelo que no correspondía a una vibración sísmica y encontró que dicha vibración natural podría ser causada por el viento, olas marinas o perturbaciones artificiales como tráfico, vibración de máquinas, etc.

### Equipos e Instrumentos Utilizados

El equipo de medición es el denominado GEODAS 15-HS (derecha, Figura 7.4) desarrollado por la Compañía Anet Co., Ltd. A continuación se detallan las características del equipo y los programas para el procesamiento:

- 01 Sistema de Adquisición de Datos GEODAS 15-HS
- 01 Computadora portátil NEC, modelo Versa Pro VS-8
- Sensores de 1Hz de frecuencia tipo CR4.5-1S
- 01 GPS GARMIN modelo GPS16x-LVS
- 01 cable de conexión para batería
- Software de adquisición de datos: Microtremor Observation (Mtobs, incluido en el GEODAS 15HS)
- Software de procesamiento de datos: m2n.exe, mtpltn2.exe, calHVm4.exe

El segundo equipo de medición es el sensor de velocidad modelo CV-374 AV2, elaborado por la empresa Tokyo Sokushin, con sistema de adquisición integrado, tal y como se muestra en la Figura 7.4 (izquierda). Algunas características de este equipo son:

- Sensores con frecuencia de medición de 0.2Hz, por lo que es posible medir periodos más largos de vibración.
- Computadora para la visualización del registro.
- Cable ethernet de conexión de datos.
- Programa P-wave para convertir datos de formato binario a texto.



**Figura 7.4.** Equipos e instrumentos utilizados durante la medición puntual de microtremores. Izquierda: sensor Tokyo Sokushin modelo CV-374 AV2. Derecha: Sensor y sistema de adquisición GEODAS-ANET

## Procedimiento de los Trabajos de Campo

Para la medición, se instala uno o varios sensores triaxiales sobre la superficie del terreno. Los sensores deben estar correctamente nivelados para asegurar la horizontalidad de las componentes horizontales de estos. En el caso del equipo de la empresa ANET, se tienden los cables que conectarán los sensores con el equipo adquisidor. A continuación, se configura la frecuencia de muestreo del equipo adquisidor y el intervalo de tiempo que se grabará. En el caso del equipo de la empresa Tokyo Sokushin, los datos se guardan en registros de diez minutos, configurados automáticamente a través de la hora GPS. Finalmente, se procede a grabar de manera continua los registros de microtremores. Estos registros deben tener duración suficiente para proveer información para el análisis y calidad de los datos al evitar ruido producido por fuentes cercanas al sensor.

La Figura 7.5 muestra la forma en que se realiza la medición puntual de microtremores, con el equipo de la empresa ANET, y la Figura 7.6 muestra la medición con el equipo de la empresa Tokyo Sokushin.

## Método de Análisis

El análisis del registro de microtremores consiste en separar éste en intervalos de igual duración, a los cuales se les calcula el espectro de Fourier. Los espectros de Fourier obtenidos en cada intervalo se promedian con la finalidad de disminuir la incertidumbre en los resultados. Finalmente, se calcula el espectro H/V según la teoría propuesta por Nakamura (1989), y que se explica a continuación.

El método H/V consiste en el cociente del espectro de Fourier de las componentes horizontales del registro de microtremores entre el espectro de Fourier de la componente vertical. El cociente obtenido, denominado espectro H/V, permite estimar el periodo fundamental del suelo.

Nakamura (1989) definió la función de transferencia  $S_T$  de capas superficiales como:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}}$$

Donde  $S_{HS}$  y  $S_{HB}$  son los espectros de Fourier del movimiento horizontal en la superficie y el movimiento horizontal en la base, respectivamente.

Sin embargo,  $S_{HS}$  es fácilmente afectado por las ondas superficiales. Y puesto que el ruido es mayormente propagado como ondas Rayleigh,  $S_{HS}$  puede ser posiblemente afectado por ondas Rayleigh. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en el espectro de Fourier del movimiento vertical en la superficie, pero no incluido en el espectro de Fourier del

movimiento vertical en la base. Asumiendo que la componente vertical no es amplificada por los estratos superficiales, la cantidad  $E_S$  debe representar el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical.  $E_S$  es definido según:

$$E_S = \frac{E_{VS}}{E_{VB}}$$



**Figura 7.5.** Ejecución del ensayo de medición puntual de microtemores en el distrito de Cieneguilla utilizando los sensores ANET



**Figura 7.6.** Ejecución del ensayo de medición puntual de microtemores en el distrito de Cieneguilla utilizando los sensores Tokyo Sokushin

Luego, asumiendo que el efecto de las ondas Rayleigh es igual para las componentes horizontal y vertical,  $S_T/E_S$  puede ser considerado como una función de transferencia  $S_{TT}$  más confiable luego de la eliminación de los efectos de las ondas Rayleigh. La función de transferencia  $S_{TT}$  es:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{S_{HS}/S_{VS}}{S_{HB}/S_{VB}} = \frac{R_S}{R_B}$$

Nakamura (1989) mostró que  $R_B$  se vuelve aproximadamente 1.0 para un rango de frecuencias relativamente grande. Lo anterior significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada considerando solo el movimiento en superficie. En consecuencia, la función de transferencia  $S_{TT}$ , que constituye el espectro H/V, es obtenida mediante:

$$S_{TT} = R_S$$

Por lo tanto, la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir del movimiento en la superficie.

El espectro H/V presenta, en teoría, un máximo en la frecuencia o periodo fundamental del suelo. Generalmente, para esta frecuencia la curva muestra un pico bien definido por valle-cresta-valle. Estos picos son más definidos en suelos formados por depósitos blandos, mientras son más anchos en suelos duros o intermedios o compuestos de materiales heterogéneos (Ordaz y Vera, 2003). En general, cuanto mayor sea el contraste entre los depósitos de suelo y el semi-espacio o estrato duro resistente, se tendrá una mejor definición en el espectro H/V y se podrá identificar más fácilmente el periodo fundamental. El espectro H/V es obtenido con la siguiente expresión:

$$H/V = \frac{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}}{S_v}$$

Donde  $S_x$  y  $S_y$  son los espectros de amplitudes de Fourier de los registros en las direcciones horizontales y  $S_v$  es el espectro de Fourier del registro en la dirección vertical.

### 7.7.2. Resultados de los Periodos Naturales de Vibración Observados

Se ha realizado el ensayo de medición puntual de microtrémores en 43 ubicaciones distribuidas uniformemente en el distrito de Cieneguilla, considerando además la información recopilada, tal y como se observa en el Mapa C.23-2.

Los periodos resultantes de las 43 mediciones puntuales de microtremores ejecutadas se muestran en la Tabla 6 del Anexo C.7. Se puede observar que el periodo máximo de estas mediciones es de 0.34 s y el periodo mínimo es de 0.07 s.

El cálculo de los períodos naturales de vibración se realizó mediante el método del cociente espectral H/V, explicado en el ítem 7.7.1. Los registros de onda de microtremores, así como los espectros de Fourier de cada una de sus componentes y su espectro H/V se muestran en el Anexo C.11.

El registro fotográfico de cada punto de medición ejecutado se encuentra en el Anexo C.22.

### 7.7.3. Ensayo de Análisis Multicanal de Ondas superficiales (MASW)

El ensayo denominado Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), es un método de exploración geofísica que permite determinar la estratigrafía de un perfil de suelo de manera indirecta, basándose en el cambio de las propiedades dinámicas de los materiales que la conforman. Este método se basa en la adecuada interpretación de las ondas superficiales (ondas Rayleigh) generadas por una fuente de energía activa, que son registradas en un arreglo multicanal a lo largo de puntos localizados a distancias predeterminadas sobre la superficie del terreno.

En este método, luego de la correcta obtención de los registros, se realiza el cálculo de su correspondiente curva de dispersión (relación entre la velocidad de fase y su frecuencia), la cual es obtenida aislando el efecto de las ondas superficiales. Esto es posible gracias a que este tipo de ondas predomina en el tren de ondas generado, conservando alrededor del 70% de la energía total liberada. Además, el valor de las velocidades de fase estimadas varía entre el 90% al 95% del valor de la velocidad de propagación de las ondas de corte. Así, mediante un procedimiento de cálculo de inversión iterativo, y a partir de la curva de dispersión calculada, se obtiene el perfil del terreno en función de  $V_s$ , el cual es representativo para el punto central de cada una de las líneas ejecutadas en la zona de estudio.

Esta técnica ha sido utilizada con bastante frecuencia en la exploración geotécnica-geofísica para cimentaciones de puentes, presas de tierra, presas de relaves y pads de lixiviación, obteniéndose buenas correlaciones con los perfiles estratigráficos del suelo en los casos donde se ha realizado ya sea perforaciones diamantinas o ensayos de penetración estándar (SPT). Debido a ello, este tipo de procedimiento goza de buena confiabilidad y constituye una alternativa para la evaluación de los

parámetros dinámicos del suelo hasta una profundidad aproximada de 30m.

### Equipos e Instrumentos a Utilizar

La Fig. 7.7 muestra, en síntesis, los equipos utilizados para la ejecución de los ensayos MASW. Así, para los ensayos de prospección geofísica en el presente estudio se utilizó básicamente lo siguiente:

- Sismógrafo McSeis-SW (Modelo-1109), desarrollado por la empresa OYO Corporation, el cual cuenta con 24 canales de entrada, cada uno con un convertidor A/D individual con resolución de 24 bit y alta velocidad de muestreo.
- 24 sensores o geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, los cuales permiten registrar las componentes verticales de las ondas generadas por la fuente activa de energía.
- Placas de aluminio para la ejecución de los ensayos en superficies pavimentadas o sobre losas de concreto.
- Martillo de 10 kg y placa base metálica de impacto.
- Computadora portátil, Laptop Pentium IV.
- Dos cables conectores de geófonos de 200 m.
- Radios de comunicación, batería y accesorios varios.



Figura 7.7. Equipo utilizado para la ejecución del ensayo MASW en el distrito de Cieneguilla

### Procedimiento de los Trabajos de Campo

En general, los trabajos de campo involucran la definición de los ejes de las líneas sísmicas proyectadas, tomando en cuenta tanto la disponibilidad de áreas libres como la escasez de información geofísica en determinadas áreas. Una vez comprobada la viabilidad de su ejecución, se procede al

tendido de la línea de geófonos y a la conexión del equipo de adquisición de datos. La distribución típica de sensores, incluyendo la ubicación de los *shots* con el martillo, posee una longitud de 66 m, lo que permite una profundidad de exploración aproximada de 30 m. Es importante señalar que el uso de platinas base permite la adecuación de líneas sísmicas sobre superficies pavimentadas o losas de concreto y, por tanto, el adecuado estudio de áreas netamente urbanas, en los que la disponibilidad de zonas libres sobre terreno natural es bastante complicada. En el caso particular del distrito de Cieneguilla, el Anexo C.22 muestra el panel fotográfico correspondiente a la ejecución de los ensayos MASW.

#### 7.7.4. Resultados de Perfiles de Velocidad de Ondas de Corte (Ensayo MASW)

Como se mencionó anteriormente, el presente estudio ha contado con información disponible concerniente a los perfiles  $V_s$  de estudios previos. Por tal razón, las líneas sísmicas ejecutadas en el distrito de Cieneguilla se han distribuido tomando en cuenta dicha información dentro del área de estudio, como se observa en el Mapa C.23-3. Un total de 22 líneas sísmicas se han ejecutado para este proyecto. Información pertinente sobre estas líneas sísmicas, tales como su código, coordenadas UTM, y otros datos relevantes, se presentan en la Tabla 7 del Anexo C.7 del presente tomo.

Es importante señalar que la fuente de energía activa utilizada para generar las ondas sísmicas consistió en el golpe de un martillo de 10 kg sobre un plato metálico, lo que permitió el registro de ondas con la adecuada nitidez para obtener resultados confiables. Así, el Anexo C.12 muestra el registro de las ondas sísmicas generadas durante la ejecución del ensayo MASW, mientras que el Anexo C.13 muestra la curva de dispersión obtenida con este método. Los perfiles de velocidades de ondas de corte obtenidos se presentan en el Anexo C.14 y un resumen de estos se muestra en la Tabla 8 del Anexo C.7.

En general, las exploraciones geotécnicas ubicadas en la zona de estudio evidencian la presencia de materiales cuya compacidad se incrementa con la profundidad. Así, y con ayuda de información geotécnica disponible en las cercanías de los lugares de ejecución de las líneas sísmicas de MASW, se puede realizar la descripción adecuada de los perfiles  $V_s$  obtenidos, tal y como se detalla a continuación:

El perfil MASW-01, ejecutado al oeste del distrito de Cieneguilla, en la calle ubicada entre las avenidas Machu Picchu y San Juan Bautista, presenta superficialmente gravas medianamente densas con una velocidad de ondas de corte en el rango entre 216 m/s y 225 m/s y 2.3 m de espesor. A

continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con un valor de  $V_s$  máximo de 751 m/s a la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 514 m/s.

El perfil MASW-02, ubicado al oeste del distrito de Cieneguilla, en una calle cerca del Grupo Caridad Cieneguilla, presenta superficialmente valores de  $V_s$  mayores a 183 m/s, pero menores a 359 m/s, lo que corresponde a materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad de 11.0 m. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  máximos de 590 m/s para la profundidad de exploración máxima de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 371 m/s.

El perfil MASW-03, ejecutado al oeste del distrito de Cieneguilla, cerca del colegio Carmelitas School de Cieneguilla II, presenta superficialmente velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) menores a 339 m/s, correspondiente a materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad de 13.2 m. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos con velocidades de ondas de corte hasta un máximo del orden de 596 m/s. Para este perfil, se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 348 m/s.

El perfil MASW-04, ubicado al oeste del distrito de Cieneguilla, en la Asociación Las Cumbres, presenta superficialmente aparente relleno / material de desmonte con valores de  $V_s$  de 174 m/s, en promedio, y un espesor estimado de 2.3 m. Este depósito yace sobre materiales medianamente compactos a compactos con  $V_s$  mayores a 186 m/s, pero menores a 307 m/s, y un espesor de 4.7 m. La rigidez de dichos materiales se incrementa hasta un estimado de 703 m/s a la profundidad estudiada de 30.0 m, los que se han caracterizado como materiales compactos a muy compactos. Así, el valor de la velocidad ondas de corte promedio para los primeros 30 m ( $V_{s30}$ ) es de 392 m/s.

El perfil MASW-05, ubicado en la zona central del distrito de Cieneguilla, cerca del grifo Esperanza - Petroperu, presenta superficialmente velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) menores a 320 m/s, correspondientes a arenas con gravas medianamente densas a densas de 3.7 m de espesor. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos cuyos valores de  $V_s$  se encuentran entre 378 m/s y 723 m/s, hasta una profundidad aproximada de 23.7 m. Finalmente, la rigidez de los depósitos aumenta hasta alcanzar velocidades de ondas de corte máximas estimadas de 869 m/s, los que se han caracterizado como materiales compactos a muy compactos / roca fracturada. Para este perfil se estima

una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 518 m/s.

El perfil MASW-06, llevado a cabo en la zona central del distrito de Cieneguilla, en la calle Augusto Bernardo Leguía, cerca del IEP Blaise Pascal, presenta superficialmente un estrato de 3.7 m de espesor, con valores de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) en el rango de 218 m/s a 279 m/s, catalogado como gravas medianamente densas a densas. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos, de espesor total de 9.5 m, con valores de  $V_s$  mayores a 368 m/s, pero menores a 719 m/s. Finalmente, la rigidez de los materiales aumenta hasta la profundidad estudiada de 30.0 m con un valor de máximo de  $V_s$  de 985 m/s. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 577 m/s.

El perfil MASW-07, ubicado en la zona central del distrito de Cieneguilla, entre las calles Bolívar y Bolognesi, presenta superficialmente valores de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) menores a 314 m/s, los que han sido catalogados como arenas con gravas medianamente densas de 3.7 m de espesor. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  en el rango de 385 m/s a 693 m/s, hasta una profundidad de 23.7 m. Estos estratos yacen sobre materiales muy compactos / roca fracturada con  $V_s$  máximo de aproximadamente 847 m/s para la profundidad de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 496 m/s.

El perfil MASW-08, ubicado en la calle Julio César Tello, al centro del distrito de Cieneguilla, presenta un estrato de 3.7 m de gravas medianamente densas a densas, cuyas velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) se encuentran en el rango de 249 m/s a 345 m/s. Subyacente a estos depósitos, se encuentran materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  mayores a 421 m/s, pero menores a 711 m/s, a los 20.9 m de profundidad. Finalmente, se hallan materiales muy compactos / roca fracturada cuyo máximo valor de  $V_s$  es de 941 m/s para los 30.0 m de exploración. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 548 m/s.

El perfil MASW-09, ejecutado también al centro del distrito de Cieneguilla, en la calle Sinchi Roca, presenta superficialmente gravas con arenas medianamente densas con un espesor de 3.7 m y velocidades de ondas de corte en el rango de 212 m/s a 286 m/s. Subyacente a estos materiales, se puede encontrar depósitos de materiales compactos a muy compactos cuyos valores de  $V_s$  se encuentran en el rango de 358 m/s a 675 m/s hasta

la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 447 m/s.

El perfil MASW-10, ubicado en la zona sur del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente arenas medianamente densas a densas, caracterizadas con velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) en el rango de 205 m/s a 253 m/s con un espesor de 3.7 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  mayores a 324 m/s, pero menores a 599 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 430 m/s.

El perfil MASW-11, ejecutado al sur del distrito de Cieneguilla, en la calle LM-119, entre las avenidas Los Tulipanes y Luis Felipe de las Casas, presenta superficialmente materiales medianamente compactos a compactos con velocidades de ondas de corte mayores a 229 m/s pero menores a 345 m/s y 1.1 m de espesor. A continuación, se encuentran estratos definidos como materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  en el rango de 362 m/s a 520 m/s hasta los 30.0 m de profundidad confiable. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 357 m/s.

El perfil MASW-12, ubicado al sur del distrito de Cieneguilla, en la calle Pelagatos, entre las avenidas Nueva Toledo y Malecón Lurín, presenta superficialmente valores de  $V_s$  mayores a 213 m/s, pero menores a 308 m/s, lo que corresponde a materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad de 3.7 m. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  máximos de 662 m/s para la profundidad de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 436 m/s.

El perfil MASW-13, ejecutado al centro del distrito de Cieneguilla, en la calle Tambo Nuevo, entre la calle Tambo Viejo y la avenida Malecón Lurín, presenta superficialmente velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) menores a 348 m/s, correspondiente a materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad de 7.0 m. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos con  $V_s$  en el rango de 365 m/s a 627 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil, se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 424 m/s.

El perfil MASW-14, ubicado al centro del distrito de Cieneguilla, en la calle Belén, entre las calles Canaán y Los Olivos, presenta superficialmente gravas medianamente densas a densas con valores de  $V_s$  en el rango de 261 m/s a 309 m/s y un espesor de 3.7 m. Este depósito yace sobre materiales catalogados como compactos a muy compactos con  $V_s$  mayores a 379 m/s, pero menores a 686 m/s, y un espesor de 23.2 m. Finalmente, es posible hallar materiales muy compactos caracterizados por una velocidad de ondas de corte de 768 m/s, en promedio, hasta la profundidad máxima estudiada de 30.0 m. Así, el valor de la velocidad ondas de corte promedio para los primeros 30 m ( $V_{s30}$ ) es de 476 m/s.

El perfil MASW-15, ubicado también en la zona central del distrito de Cieneguilla, en la calle Carrizal, entre la calle Pachacámac y avenida Malecón Lurín, presenta superficialmente velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) menores a 340 m/s, correspondientes a materiales medianamente compactos a compactos de 7.0 m de espesor. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos cuyos valores de  $V_s$  se encuentran entre 369 m/s y 666 m/s, hasta la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 425 m/s.

El perfil MASW-16, llevado a cabo en la zona central del distrito de Cieneguilla, en la calle Casa Vieja, entre las calles Rosaspata y Wallallo, presenta superficialmente un estrato de 7.0 m de espesor, con valores de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) en el rango de 228 m/s a 360 m/s, catalogado como materiales medianamente compactos a compactos. Seguidamente, la rigidez de los materiales aumenta hasta la profundidad estudiada de 30.0 m con un valor de máximo de  $V_s$  de 682 m/s. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 449 m/s.

El perfil MASW-17, ubicado en la zona norte del distrito de Cieneguilla, entre las calles 2, 3 y 12, presenta superficialmente valores de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) menores a 171 m/s, los que han sido catalogados como aparente relleno superficial seguido de material granular suelto de 2.3 m de espesor. A continuación, se hallan materiales medianamente compactos a compactos con valores de  $V_s$  en el rango de 195 m/s a 347 m/s, hasta una profundidad de 7.0 m. Estos estratos yacen sobre materiales compactos a muy compactos con  $V_s$  máximo de aproximadamente 746 m/s para la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 426 m/s.

El perfil MASW-18, ubicado en la calle 26, entre la calle 25 y la avenida Nueva Toledo, al norte del distrito de Cieneguilla, presenta un estrato de 7.0 m de materiales medianamente compactos a compactos, cuyas velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) se encuentran en el rango de 184 m/s a 327 m/s. Subyacente a estos depósitos, se encuentran materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  mayores a 365 m/s, pero menores a 640 m/s, hasta los 30.0 m de profundidad máxima de exploración. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 414 m/s.

El perfil MASW-19, ejecutado también al norte del distrito de Cieneguilla, en la calle 50, entre la calle 58 y la avenida E, presenta superficialmente materiales medianamente compactos a muy compactos con un espesor de 5.3 m y velocidades de ondas de corte en el rango de 179 m/s a 305 m/s. Subyacente a estos materiales, se puede encontrar depósitos de materiales compactos a muy compactos cuyos valores de  $V_s$  se encuentran en el rango de 377 m/s a 571 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 389 m/s.

El perfil MASW-20, ubicado en la calle principal de la Asociación de Vivienda en la Residencial Río Seco, en la zona norte del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente materiales medianamente compactos, caracterizados con velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) en el rango de 236 m/s a 247 m/s con un espesor de 2.3 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  mayores a 355 m/s, pero menores a 740 m/s, hasta la profundidad de 26.8 m. Finalmente, se encuentran estratos de materiales muy compactos con un valor de  $V_s$  máximo promedio de 829 m/s. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 545 m/s.

El perfil MASW-21, llevado a cabo en la zona noreste del distrito de Cieneguilla, en la avenida Huarochirí, en el centro poblado Chontay, presenta superficialmente un estrato de 2.3 m de espesor, con valores de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) en el rango de 269 m/s a 307 m/s, catalogado como materiales medianamente compactos a compactos. Este depósito yace sobre materiales compactos a muy compactos, de espesor total de 27.7 m, con valores de  $V_s$  mayores a 420 m/s, pero menores a 557 m/s, hasta la profundidad estudiada de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 463 m/s.

El perfil MASW-22, ubicado en la zona oeste del distrito de Cieneguilla, en la Asociación San Gabriel, a la altura de la avenida Cieneguilla, presenta superficialmente valores de velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) menores a 314 m/s, los que han sido catalogados como materiales medianamente compactos a muy compactos de 3.7 m de espesor. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_s$  en el rango de 374 m/s a 707 m/s, hasta la profundidad de exploración máxima de 30.0 m. Para este perfil se estima una velocidad de ondas de corte promedio para los 30 primeros metros ( $V_{s30}$ ) de 465 m/s.

#### 7.7.5. Ensayo de Medición de Arreglo de Microtremores

Este ensayo tiene por finalidad estimar el perfil de velocidades de ondas de corte del suelo a mayores profundidades que las obtenidas con metodologías tradicionales. Dicha profundidad depende principalmente de la frecuencia de muestreo y el radio máximo del arreglo.

El principio de la medición de arreglos de microtremores radica en el hecho de que éstos consisten predominantemente de ondas Rayleigh, y que el análisis espectral de estas ondas puede reproducir sus características dispersivas, las cuales reflejan el perfil de velocidades de ondas de corte del sitio en estudio (Tokimatsu et al., 1992a; 1992b).

#### Equipos e Instrumentos Utilizados

El equipo a utilizar es el mismo que se emplea para la medición puntual de microtremores, consiste de velocímetros (sensores de velocidad) de bobina móvil CR 4.5-1S, con el sistema de adquisición de datos GEODAS 15HS producido por la Compañía Anet Co., Ltd. Las características de este equipo son:

- 01 sistema de adquisición de datos GEODAS 15-HS.
- 01 computadora portátil NEC, modelo Versa Pro VS-8.
- 06 sensores de 1Hz de frecuencia 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 para adquisición de datos: Microtremor Observation.
- Software para procesamiento de datos: Lfk2.exe, Hrfk8.exe, Calhvm4.exe, Crspn5.exe, M2n.exe, Mtplt2.exe.

#### Procedimiento de los Trabajos de Campo

A continuación se describe el procedimiento para la ejecución del ensayo de arreglo de microtremores en campo:

El primer paso es realizar el trazo y replanteo para definir la ubicación de los sensores en los círculos y líneas que pertenecen al arreglo. Preliminarmente, en gabinete, se deben de haber definido los radios de los círculos y el espaciamiento entre sensores de las líneas.

A continuación, se colocan los sensores en los puntos antes definidos. En el caso de los arreglos circulares, se colocan 03 sensores alrededor de éste con un sensor adicional en el centro. Luego, se tienden los cables que conectarán cada sensor con el equipo adquirente de señales (Figura 7.8).

Finalmente, se configura el equipo de adquisición, colocando para ello la frecuencia del muestreo, el tiempo total de registro, y el número de sensores utilizados, para así comenzar la medición.

El procedimiento de los arreglos lineales es similar a los circulares, con la diferencia que en este caso es necesaria la aplicación de una fuente externa de vibración. Dicha fuente se genera por el trote de personas a una distancia de aproximadamente dos veces la longitud de la línea.



**Figura 7.8.** Ejecución del ensayo de arreglo de microtremores (circular) en el distrito de Cieneguilla

### **Método de Análisis**

El análisis de las señales registradas en los arreglos de microtremores se puede dividir en dos etapas, la primera referida al cálculo de la curva de dispersión y la segunda a la inversión de dicha curva para obtener el perfil característico de velocidades de ondas de corte.

### **Cálculo de la Curva de Dispersión**

El cálculo de la curva de dispersión puede ser realizada por diferentes métodos, entre los cuales se encuentran el método de Alta Resolución

Frecuencia - Número de Onda (f-k), el método de Autocorrelación Espacial (SPAC) y los métodos CCA y nc-CCA. A continuación, se describen brevemente estas metodologías:

#### *Método de Alta Resolución Frecuencia - Número de Onda (F-K)*

Este método fue desarrollado por Capon (1969), y es una técnica simple para la extracción de las velocidades de propagación en un rango de frecuencias determinado para un registro de microtremores (Asten, M. y Henstridge, J., 1984).

Capon (1969) sugirió el uso de los espectros cruzados entre cada par de sensores como un factor útil para el cómputo del espectro de poder f-k. Esta relación puede ser expresada como:

$$P'_{(k_x, k_y, k_z, f)} = \left[ \sum_{n,m=1}^K q_{mn}(f) \cdot \exp\{-i2\pi[k_x(x_n - x_m) + k_y(y_n - y_m)]\} \right]^{-1}$$

Donde K es el número de canales,  $k_x$  es el número de onda en la dirección x, y  $k_y$  el número de onda en la dirección y, y f es la frecuencia.  $q_{mn}(f)$  es la inversa de la matriz Hermitiana cuyos elementos están formados por el espectro cruzado entre los canales m y n.  $(x_n, y_n)$  son las coordenadas del sensor n y  $(x_m, y_m)$  son las coordenadas del sensor m.

#### *Método SPAC*

Teniendo en cuenta que la teoría de microtremores se basa en el registro de ondas superficiales y asumiendo que estos son estacionarios en el espacio y tiempo, Aki (1957) propone el método SPAC (Auto-correlación Espacial), donde se considera un arreglo circular con sensores en los vértices de un polígono regular que registran ondas Rayleigh generadas por el ruido ambiental. Posteriormente, y a través funciones de auto-correlación e información de azimuth, es posible extraer la curva de dispersión de velocidades de fase de ondas superficiales en determinado rango de longitudes de onda efectiva.

#### *Métodos CCA y nc-CCA*

El método CCA, cuyas siglas significan arreglo circular sin centro, fue propuesto por Cho et al. en el año 2004 y es una extensión del análisis SPAC. Este método basa su teoría en la correlación entre los registros verticales de los sensores que componen el arreglo. El método CCA ha probado ser de gran utilidad para la obtención de curvas de dispersión para longitudes de onda efectiva mayores a las comúnmente consideradas.

Por otro lado, el método nc-CCA (donde nc significa compensación del ruido) es un método que permite la corrección de las subestimaciones de las velocidades de fase debido al ruido que podrían ocurrir cuando se aplica el análisis CCA (Tada et al 2007; 2010).

### **Análisis de Inversión**

El estudio de la dispersión de ondas superficiales hace posible la extracción de un modelo de suelo (en la forma de perfil de velocidades de ondas de corte) a partir de registros de sismos, explosiones o microtemores y su correspondiente inversión. (Dorman y Ewing, 1962; Aki y Richards, 1980; Mari, 1984).

Generalmente, la curva de dispersión obtenida por medio de ensayos geofísicos es una función no lineal de diferentes propiedades del suelo en estudio; entre ellas tenemos: velocidades de ondas de compresión, velocidades de ondas de corte, densidades y espesores de las capas. (Xia, et al, 1999). El procedimiento utilizado es denominado de inversión (efecto- causa), ya que en base a la curva de dispersión obtenida mediante ensayos geofísicos activos y pasivos, regresaremos a la obtención de los parámetros dinámicos que la generaron.

#### **7.7.6. Resultados de Perfiles de Velocidades de Ondas de Corte (Ensayo de Arreglos de Microtemores)**

El ensayo de arreglo de microtemores se ha ejecutado en el parque cerca del puente Paquilma, ubicado en la zona central del distrito de Cieneguilla, tal como se muestra en el Mapa C.23-3.

El procesamiento de datos se realizó según el método de análisis explicado en el ítem 7.7.5. Siguiendo este procedimiento se analizaron los registros de ondas que se muestran en el Anexo C.15, se calculó la curva de dispersión que se muestra en el Anexo C.16, y se estimó el perfil de velocidades de ondas de corte que se muestra en el Anexo C.17. Finalmente, se realizó una verificación del perfil comparando las curvas de dispersión y espectros H/V observados y calculados, los cuales se muestran en el Anexo C.18.

En las Tablas 9 y 10 del Anexo C.7 se muestra las coordenadas de la ubicación del ensayo y las velocidades y tipos de materiales encontrados en el perfil, los cuales son descritos a continuación:

El perfil A-01 presenta un estrato superficial de 6.0 m de profundidad cuya velocidad de ondas de corte varía entre 183 m/s y 250 m/s aproximadamente y que corresponde a un aparente relleno superficial seguido de material medianamente compacto. Subyace a este estrato un material compacto que se extiende hasta una profundidad estimada de 20.7 m, con una velocidad promedio de 534 m/s. A continuación, se encuentran materiales muy compactos o roca fracturada con un espesor considerado de 19.5 m y una velocidad característica de 1255 m/s, aproximadamente. Finalmente, se considera la presencia de roca sana con velocidades de ondas de corte mayores a 1700 m/s.

### 7.7.7. Ensayo de Refracción Sísmica

El ensayo de refracción sísmica es un método de exploración geofísica que permite estimar, de manera indirecta, la estratigrafía del subsuelo a lo largo de la línea de ensayo en la forma de su distribución de ondas compresionales. Este método se basa en la refracción de dicho tipo de ondas sísmicas que viajan a través de medios con diferentes propiedades elásticas y, principalmente, consiste en la interpretación de su tiempo de llegada en un registro de arreglo multicanal, que son generadas por una fuente de energía impulsiva en puntos localizados a distancias predeterminadas a lo largo de una línea sobre la superficie del terreno.

La energía generada viaja directamente a través de la capa de suelo más superficial o por las capas de suelo más profundas antes de regresar a la superficie debido a la refracción. Así, las ondas son registradas por los sensores o geófonos igualmente espaciados a cierta distancia establecida. Después de cierta longitud desde el punto de la generación de energía, la onda refractada es observada como la primera onda en arribar. La refracción sísmica utiliza el proceso de refracción crítica para inferir las profundidades de las fronteras entre capas de suelo y velocidades de estas (Anomohanran, 2013). El análisis se realiza utilizando curvas denominadas “dromocrónicas”, las cuales representan el tiempo de llegada de las ondas sísmicas en cada geófono. De estas curvas se pueden determinar los estratos y las velocidades de ondas de compresión en el perfil de velocidades del suelo.



Figura 7.9. Ejecución del ensayo de refracción sísmica en el distrito de Cieneguilla

## Equipos e Instrumentos Utilizados

El equipo utilizado en los ensayos de refracción sísmica (Fig. 7.9) es básicamente el usado para la ejecución del ensayo MASW. Para mayor detalle de los equipos empleados, revisar la Sección 7.7.3 del presente informe.

## Procedimiento de los Trabajos de Campo

Los trabajos de campo para la ejecución del ensayo de refracción sísmica consisten, en primer lugar, en la definición de los ejes de las líneas sísmicas proyectadas para posteriormente disponer los geófonos y la instalación de los cables de conexión al equipo de adquisición de datos. El espaciamiento entre geófonos durante el ensayo se define considerando la profundidad de exploración requerida, la fuente de energía utilizada para generar las ondas sísmicas, y el espacio disponible en la zona de trabajo. La fuente artificial utilizada es el golpe de un martillo de 10 kg sobre un plato metálico, como se muestra en la Figura 7.7. La longitud de la línea sísmica fue de 48 m, permitiendo explorar el subsuelo aproximadamente 16 m.

El Anexo C.22 presenta el panel fotográfico que evidencia los trabajos de campo que se realizaron durante la ejecución del ensayo de refracción en la zona de estudio.

### 7.7.8. Resultados de Perfiles de Velocidad de Onda de Compresión (Ensayo de Refracción Sísmica)

Las líneas de refracción sísmica en el distrito de Cieneguilla se han distribuido uniformemente dentro del área de estudio y han sido ejecutadas en las mismas o cercanas ubicaciones a sus correspondientes líneas de MASW, tal y como se observa en el Mapa C.23-3. Del total de ubicaciones seleccionadas, únicamente 17 líneas sísmicas se presentan en esta sección debido a las limitaciones del método de estimar resultados confiables tanto en el caso en el que la línea se disponga sobre superficies rígidas (losas de concreto o vías pavimentadas) como cuando se registra ruido en las señales, ya sea por acción del viento u otros agentes externos. Cabe resaltar que, en aras de una mejor comprensión del texto, el código de identificación de cada ensayo mantiene la misma numeración que la de los ensayos MASW. Finalmente, información pertinente sobre estas líneas sísmicas, tales como su código, longitud, coordenadas UTM, entre otros datos, se presentan en la Tabla 11 del Anexo C.7 del presente tomo.

El Anexo C.19 muestran los registros de las ondas sísmicas generadas durante la ejecución del ensayo de refracción sísmica, mientras que el Anexo C.20 se observan las dromocrónicas obtenidas con este método. Los perfiles de velocidades ondas P obtenidos se presentan en el Anexo

C.21, y un resumen de estos se muestran en la Tabla 12 del Anexo C.7 del presente tomo. A continuación, se describe a detalle los perfiles  $V_p$  determinados con el método de refracción sísmica, considerando además la información geotécnica cercana y los resultados previos de las líneas MASW:

El perfil LS-01, ejecutado al oeste del distrito de Cieneguilla, en la calle ubicada entre las avenidas Machu Picchu y San Juan Bautista, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 410 m/s a 700 m/s, los que se han caracterizado como gravas medianamente densas hasta una profundidad estimada de 1.9 m. A continuación, dichos valores de  $V_p$  se incrementan gradualmente hasta alcanzar velocidades de 960 m/s, típico de materiales compactos a muy compactos. La profundidad máxima de exploración de esta línea sísmica ha sido de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-04, ubicado al oeste del distrito de Cieneguilla, en la Asociación Las Cumbres, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) superiores a 300 m/s, pero menores a 450 m/s, los que se han caracterizado como aparente relleno / material de desmonte hasta una profundidad estimada de 2.8 m. A partir de allí, el valor de  $V_p$  se incrementa gradualmente hasta alcanzar los 700 m/s, lo que evidencia la presencia de materiales medianamente compactos a compactos hasta los 6.9 m de profundidad. Finalmente, se estima encontrar materiales compactos con valores de  $V_p$  máximos de, en promedio, 800 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-05, ubicado en la zona central del distrito de Cieneguilla, cerca del grifo Esperanza - Petroperu, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 350 m/s, pero menores a 600 m/s, los que se han catalogado como arenas con gravas medianamente densas a densas de 4.7 m de espesor estimado. A continuación, dichos valores se incrementan gradualmente hasta alcanzar un valor máximo de 1100 m/s, lo que evidencia la presencia de materiales compactos a muy compactos. La profundidad máxima de exploración de esta línea sísmica ha sido de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-07, ubicado en la zona central del distrito de Cieneguilla, entre las calles Bolívar y Bolognesi, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 350 m/s, pero menores a 600 m/s, los que se han catalogado como arenas con gravas medianamente densas a densas de un espesor estimado de 6.0 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos, con valores de  $V_p$  menores a 930 m/s, hasta los 16 m de profundidad máxima de exploración.

El perfil LS-08, ubicado en la calle Julio César Tello, al centro del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 400 m/s, pero menores a 700 m/s, los que han sido catalogados como gravas con arenas medianamente densas a densas hasta una profundidad estimada de 4.6 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_p$  en el rango de 700 m/s a 900 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-09, ejecutado también al centro del distrito de Cieneguilla, en la calle Sinchi Roca, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 330 m/s a 600 m/s, los que han sido catalogados como gravas con arenas medianamente densas a densas hasta una profundidad estimada de 3.4 m. A partir de allí, los valores de  $V_p$  superan los 600 m/s, típico de materiales compactos a muy compactos, para la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-10, ubicado en la zona sur del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 340 m/s a 700 m/s, los que se han catalogado como arenas medianamente densas a densas de un espesor estimado de 3.1 m. Subyacente a dichos depósitos, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_p$  que alcanzan un máximo de 920 m/s a la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-12, ubicado al sur del distrito de Cieneguilla, en la calle Pelagatos, entre las avenidas Nueva Toledo y Malecón Lurín, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 340 m/s a 700 m/s, los que se han catalogado como materiales medianamente compactos a compactos, hasta una profundidad de 4.1 m. A continuación, los valores de  $V_p$  se incrementan drásticamente, superando los 1000 m/s, lo que evidencia la probable presencia de material saturado hasta la profundidad máxima de exploración de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-13, ejecutado al centro del distrito de Cieneguilla, en la calle Tambo Nuevo, entre la calle Tambo Viejo y la avenida Malecón Lurín, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 320 m/s a 700 m/s, los que se han caracterizado como materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad estimada de 8.1 m. A continuación, dichos valores de  $V_p$  se incrementan rápidamente, superando los 1000 m/s, lo que podría evidenciar la probable presencia de materiales saturados. La profundidad máxima de exploración de esta línea sísmica ha sido de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-15, ubicado también en la zona central del distrito de Cieneguilla, en la calle Carrizal, entre la calle Pachacámac y avenida Malecón Lurín, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) superiores a 320 m/s, pero menores a 700 m/s, los que se han caracterizado como materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad estimada de 6.2 m. A partir de allí, los valores de  $V_p$  se incrementan drásticamente, superando los 1000 m/s, hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-16, llevado a cabo en la zona central del distrito de Cieneguilla, en la calle Casa Vieja, entre las calles Rosaspata y Wallallo, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 350 m/s, pero menores a 700 m/s, los que se han catalogado como materiales medianamente compactos a compactos de 7.7 m de espesor estimado. A continuación, dichos valores se incrementan rápidamente, superando los 1300 m/s, lo que evidencia la probable presencia de materiales saturados. La profundidad máxima de exploración de esta línea sísmica ha sido de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-17, ubicado en la zona norte del distrito de Cieneguilla, entre las calles 2, 3 y 12, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 300 m/s, pero menores a 350 m/s, los que se han catalogado como aparente material de relleno seguido de material granular suelto de un espesor estimado de 3.0 m. A continuación, se hallan materiales medianamente compactos a compactos, con valores de  $V_p$  en el rango de 350 m/s a 700 m/s, hasta los 5.3 m de profundidad. Finalmente, los valores de  $V_p$  superan rápidamente los 1000 m/s, lo que sugiere la probable presencia de materiales saturados, hasta la profundidad máxima de exploración de aproximadamente 16 m.

El perfil LS-18, ubicado en la calle 26, entre la calle 25 y la avenida Nueva Toledo, al norte del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 300 m/s, pero menores a 700 m/s, los que han sido catalogados como materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad estimada de 6.2 m. A continuación, debido al incremento drástico de los valores de  $V_p$ , que superan los 1200 m/s, se presume la probable presencia de materiales saturados, hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-19, ejecutado también al norte del distrito de Cieneguilla, en la calle 50, entre la calle 58 y la avenida E, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 300 m/s a 750 m/s, los que han sido catalogados como materiales medianamente

compactos a compactos hasta una profundidad estimada de 5.5 m. A partir de allí, los valores de  $V_p$  se incrementan rápidamente, superando los 1100 m/s, lo que sugiere la probable presencia de materiales saturados, hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

El perfil LS-20, ubicado en la calle principal de la Asociación de Vivienda en la Residencial Río Seco, en la zona norte del distrito de Cieneguilla, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 350 m/s a 700 m/s, los que se han catalogado como materiales medianamente compactos de un espesor estimado de 3.7 m. Subyacente a dichos depósitos, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_p$  gradualmente crecientes que alcanzan un máximo de 1000 m/s a la profundidad de exploración de 16 m.

El perfil LS-21, llevado a cabo en la zona noreste del distrito de Cieneguilla, en la avenida Huarochirí, en el centro poblado Chontay, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) en el rango de 400 m/s a 800 m/s, los que se han catalogado como materiales medianamente compactos a compactos, hasta una profundidad de 1.0 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_p$  mayores a 800 m/s, pero menores a 1350 m/s, hasta los 16 m de profundidad de exploración máxima

El perfil LS-22, ubicado en la zona oeste del distrito de Cieneguilla, en la Asociación San Gabriel, a la altura de la avenida Cieneguilla, presenta superficialmente velocidades de ondas de compresión ( $V_p$ ) mayores a 320 m/s, pero menores a 600 m/s, los que han sido catalogados como materiales medianamente compactos a compactos hasta una profundidad estimada de 3.8 m. A continuación, se hallan materiales compactos a muy compactos con valores de  $V_p$  en el rango de 600 m/s a 800 m/s hasta la profundidad máxima de exploración de 16 m.

## 8. MAPAS

### 8.1. Tipos de Suelo

De acuerdo a las características geológicas, geomorfológicas y a los datos de los estudios geotécnicos ejecutados y recopilados, se ha determinado que en el área de estudio predominan las gravas de origen aluvial y coluvio-aluvial; las primeras se encuentran emplazadas en el margen del río Lurín, mientras que las segundas se ubican predominantemente en las quebradas. En menor proporción se presentan depósitos focalizados de arenas y/o arcillas, además de esto, se ha identificado áreas importantes de rellenos antrópicos. Los Mapas II-2A y II-2B del presente Tomo II, muestran los tipos de suelos a 1.0 y 2.5 m de profundidad,

respectivamente. En estos mapas también se han representado los afloramientos rocosos, en base a la información proporcionada por la geología.

A continuación, se detallan las características de cada uno de estos tipos de suelos.

### **Gravas**

En la zona que abarca el valle del río Lurín, este material está conformado por depósitos de gravas y bolonerías inmersas en una matriz areno-limo-arcillosa, presentan una compacidad densa, un contenido de humedad medio y tienen formas sub-redondeadas y redondeadas. En las zonas de las quebradas, las gravas se encuentran inmersas en una matriz areno-limosa, presentan una compacidad densa, un bajo contenido de humedad y tienen formas sub angulosas y angulosas. En general, en cuanto a su clasificación predominan las gravas mal gradadas y mal gradadas con limo (GP, GP-GM). Cabe mencionar que este material puede encontrarse cubierto por estratos superficiales de arenas, limos y/o arcillas.

### **Arenas**

Se han encontrado pequeñas áreas donde existe concentraciones de arenas. En la zona de las quebradas predominan las arenas mal gradadas y arenas limosas (SP, SM) de origen coluvio-aluvial, estos materiales presentan una compacidad densa, un bajo contenido de humedad, una baja o nula plasticidad y tiene formas sub angulosas. En la zona del valle del río Lurín predominan las arenas mal gradadas (SP) de origen aluvial y eólico, las cuales presentan una compacidad media y un contenido de humedad variable.

### **Limos y/o arcillas**

Aunque se ha evidenciado la influencia de la arcilla y el limo (sobre este último) en la matriz que conforman los distintos tipos de suelos encontrados en el área de estudio, solo se ha identificado un pequeño sector en donde predominan estos materiales, el cual se encuentra ubicado en la parte noroeste del mismo. En este lugar estos materiales presentan una consistencia media y un bajo contenido de humedad.

### **Rellenos**

Los rellenos antrópicos están compuestos por desperdicios humanos, como restos de basura, materiales de desmonte, escombros, etc. Debido a su falta de compactación y heterogeneidad, resulta complejo predecir el comportamiento mecánico y dinámico de estos materiales.

En el área de estudio, se han identificado dos zonas de gran extensión donde se presentan estos materiales. Estas zonas se encuentran ubicadas en la parte noroeste, en el margen de la avenida Cieneguilla. Se presume que antiguamente

esta zona fue utilizada como una cantera para la obtención de materiales de construcción, producto del cual se formaron unas hondonadas en el suelo, las cuales fueron rellenadas y posteriormente habitadas. La Figura 8.1 muestra la primera de estas zonas, en ella se observa la distribución actual de las viviendas y como se ha trastocado el nivel del suelo. Las calicatas C-01 y C-02 han corroborado esta información, encontrándose en las mismas, material de relleno conformado por restos escombros, desmonte y basura.



**Figura 8.1.** Proceso de emplazamiento de viviendas (Sector I) .Fuente: Google Earth



**Figura 8.2.** Proceso de emplazamiento de viviendas (Sector II). Fuente: Google Earth

La Figura 8.2 muestra la segunda zona, como en el caso anterior también se observa la configuración actual de las viviendas y la alteración que ha sufrido la superficie del suelo con el paso de los años. Haciendo un análisis de las figuras mostradas, resulta válido pensar que la profundidad del relleno en ambas zonas debe ser muy variable. La potencia máxima de relleno que se existirá en un determinado lugar queda fuera de los alcances de este estudio, por lo que se recomienda realizar estudios específicos de las zonas de relleno indicadas en el presente informe.

## 8.2. Microzonificación Geotécnica

La evaluación geotécnica del área en estudio ha permitido delimitar los diferentes tipos de suelos existentes en el área de estudio. A partir de esta delimitación, se ha procedido a agrupar los diferentes tipos de suelos según sus características geotécnicas similares. El propósito de esta agrupación ha sido definir el Mapa de Microzonificación Geotécnica el cual permite identificar zonas favorables y desfavorables para la cimentación de viviendas convencionales.

La Microzonificación Geotécnica incluyó, la estimación de la capacidad de carga admisible que tendría la cimentación de una edificación convencional definida con cimientos corridos de 0.60 m de ancho y una profundidad de cimentación mínima de 0.80 m. El criterio de diseño de una cimentación considera que para garantizar el comportamiento satisfactorio de esta, se deben cumplir las dos condiciones siguientes:

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

Para tal fin, se ha utilizado la teoría de capacidad de carga por Terzaghi, con los factores de capacidad de carga propuestos por Vesic (1973). La evaluación de la capacidad de carga admisible ha sido realizada para los suelos más representativos del área de estudio usando un factor de seguridad de 3.

Cabe señalar que la Norma E.050 indica que no se debe cimentar sobre: turba, suelo orgánico, tierra vegetal, relleno de desmonte o relleno sanitario o industrial, ni rellenos no controlados. Estos materiales no permitidos tienen que ser removidos en la totalidad del terreno, antes de ejecutar cualquier tipo de obra.

De los resultados obtenidos el área de estudio ha sido clasificada en tres zonas, denominadas Zona I, Zona II, y Zona V. Es importante indicar que en el distrito de Cieneguilla no se ha encontrado ni identificado material de suelo cuyas características correspondan a una Zona III o Zona IV. El Mapa II-3 del presente Tomo II muestra la microzonificación geotécnica propuesta para el distrito de Cieneguilla. A continuación, se describe las características correspondientes a cada zona.

### Zona I

Esta zona está conformada por afloramientos de rocas con diferentes grados de fracturación, predominan las rocas ígneas intrusivas como la gabro-diorita y la granodiorita, las cuales, en algunas zonas, intuyen a rocas sedimentarias.

Las gravas y arenas de origen aluvial y coluvio-aluvial, de compacidades densas, también se incluyen en esta zona. Las gravas de origen aluvial presentan formas sub redondeadas, están inmersas en una matriz areno-limo-arcillosa y se encuentran predominantemente en el valle del río Lurín. Las arenas de origen coluvio-aluvial, se encuentran emplazadas en las quebradas que presenta el distrito, tienen formas angulosas, bajos contenidos de humedad y una baja o nula plasticidad.

La capacidad de carga admisible estimada en esta zona, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho y un desplante mínimo de 0.80 m, es de 5.0 kg/cm<sup>2</sup> si se desplanta roca fracturada y de 2.0 a 4.0 kg/cm<sup>2</sup> si se desplanta sobre grava o arena. Estos materiales presentan las mejores características geotécnicas para cimentar viviendas convencionales.

Debido a la dispersión de resultados obtenidos en los ensayos químicos, no se puede definir un único tipo de cemento contra el ataque de los sulfatos en esta zona, sin embargo, considerando el tema de seguridad, se recomienda el uso de Cemento Portland Tipo II, hasta que un estudio detallado de sitio defina lo contrario.

## Zona II

Esta zona se encuentra conformada por depósitos de arenas de origen aluvial y eólico, de compacidad media. También se encuentran, aunque en menor proporción, depósitos de limos y/o arcillas de consistencia media. Estos materiales se encuentran predominantemente en la parte central del distrito y se entiende que sobreyacen a los depósitos de gravas o a las rocas.

La capacidad de carga admisible estimada, considerando una cimentación corrida de 0.60 m de ancho y un desplante mínimo de 0.80 m, varía entre 1.20 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>. Estos materiales presentan características geotécnicas favorables para cimentar viviendas convencionales.

Con el criterio seguido en la Zona I, se recomienda el uso de Cemento Portland Tipo II, debido a una elevada concentración de sulfatos presentes en el suelo que conforma esta zona.

## Zona V

Esta zona está conformada por rellenos antrópicos no controlados de potencia variable. Dada la heterogeneidad de este tipo de materiales, es sumamente complicado predecir su comportamiento mecánico, por esta razón, y siguiendo las recomendaciones de la Norma E050 (2018) de debe restringir todo tipo de construcción en esta zona hasta no haber removido en su totalidad el material de relleno.

### 8.3. Zonas de Isoperiodos

El Mapa II-4 del presente Tomo II muestra el mapa de isoperiodos para el distrito de Cieneguilla, el cual presenta tres zonas que se detallan a continuación:

La Zona I, mostrada en color verde oscuro, es aquella en la que presentan periodos de vibración natural del suelo menores a 0.20 s, con picos en periodos menores a dicho valor o formas espectrales relativamente planas. Esta zona abarca la mayor parte del área de influencia del distrito, principalmente aquellas cercanas a formaciones rocosas. Las características dinámicas de vibración de esta zona corresponden a un suelo rígido.

La Zona II, mostrada en color verde claro, es aquella en la que se presentan periodos de vibración natural del suelo mayor o igual a 0.20 s y menores a 0.30 s. En general, dicha zona abarca las áreas cercanas al cauce del río Lurín y ciertas regiones adyacentes o en rellenos antrópicos no controlados. Las características dinámicas de vibración de esta zona pueden ser asociadas a suelos medianamente rígidos.

La Zona III, mostrada en color amarillo, es aquella en la que se presentan periodos de vibración natural del suelo mayor o igual a 0.30 s y menores a 0.50 s. Áreas muy puntuales han sido caracterizadas de esta manera, principalmente, aquellas circundantes a las mediciones M-09 y M-19, al norte y al sureste del distrito, respectivamente. Las características dinámicas de vibración de esta zona pueden ser catalogadas como medianamente flexibles.

### 8.4. Peligros Relacionados a Eventos Naturales (Peligros Geológicos)

En la naturaleza, existen peligros naturales, entre ellos tenemos a los Peligros Geológicos, que involucra aquellos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudicial al hombre y causado por fuerzas ajenas a él (Burton 1978).

Es importante entender que la intervención humana puede aumentar la frecuencia y severidad de los peligros naturales. También, puede generar peligros donde no existían antes. Además, las medidas de control pueden causar o agravar los efectos destructivos de los fenómenos naturales, también pueden reducirlos o eliminarlos (OEA, 1993).

Más específicamente en el componente geológico del presente estudio, los peligros naturales son utilizados en referencia a los peligros geológicos, geológico-geotécnico, geológico-climáticos que, por razón del lugar en que ocurren, su severidad y frecuencia, pueden afectar de manera adversa a los seres humanos y a sus actividades.

Los peligros geológicos que se deben tener en cuenta, pueden producirse más que nada como consecuencia de lluvias extraordinarias, estas producirían

inundaciones, al estar las quebradas tapadas por material eólico, además de producir huaycos.

También hay que tomar en cuenta la movilidad de los médanos. Los vientos traen arenas levantadas del litoral y constantemente las están depositando en el área.

En el estudio, están considerados los elementos que se deben a las fuerzas naturales internas (sismicidad) y los que se pueden generar a partir de estos, como: tsunamis, deslizamiento, desprendimientos, hundimientos, etc.

#### 8.4.1. Peligros Geológicos

##### Geodinámica Externa

Pueden ser derrumbes, caídas de rocas y flujos de detritos (huaycos, flujos de lodo, avalanchas de rocas o detritos), reptación de laderas.

El área de estudio ha sufrido fenómenos de geodinámica externa, más que nada por caída de rocas, huaycos, erosión de riberas, deslizamientos de derrubios.

##### Geodinámica Interna

Los procesos de geodinámica interna, está referida a la actividad sísmica y actividad volcánica. En nuestra Patria, el mayor peligro geológico relacionado a la geodinámica interna es la actividad sísmica.

#### 8.4.2. Mapa de Peligros Geológicos

Las geoformas existentes en las áreas estudiadas del distrito de Cieneguilla, lo conforman un valle donde discurre el río Lurín, y afloramientos rocosos, que conforman lomadas y cerros. Las rocas están compuestas por afloramientos de rocas ígneas intrusivas, y rocas sedimentarias, estas últimas mayormente de composición calcárea.

Los procesos de geodinámica externa, están relacionadas a acción de las precipitaciones pluviales extraordinarias, que pueden producir flujos de lodo y rocas, deslizamientos, aumento de las aguas del río Lurín y quebradas, produciendo huaycos, inundaciones y erosión de riberas. Se debe considerar que el urbanismo en los últimos años, ha trastocado los relieves naturales, pudiendo en cierta forma afectar el equilibrio natural de las geoformas, como es el caso que al haber sido ocupadas por viviendas algunas laderas y en los terrenos planos aledaños al valle del río Lurín, ha desestabilizado el equilibrio de las laderas, pudiéndose producir deslizamientos.

Los peligros geológicos en el distrito de Cieneguilla, se han determinado a base de las características geomorfológicas, litológicas, procesos geodinámicos y geotécnicos. Se ha elaborado un mapa de peligros geológicos, relacionados a los procesos de geodinámica externa, donde se

representa la dispersión areal de las diferentes intensidades de los peligros, asimismo la extensión y el porcentaje de área que ocupan.

La delimitación de áreas por nivel de peligro geológico del distrito de Cieneguilla se encuentra en el Mapa II-5 Peligro de Origen Natural (Origen Geológico) del Informe del Tomo II. El rango de peligrosidad geológica, va desde alto, medio y bajo.

A continuación, se describe las tres zonas de zonificación por peligro geológico

### **Peligro alto**

Se considera como Peligro Geológico Alto, al cauce del río Lurín y a las quebradas Tinajas, Cieneguilla, Tambo Viejo, Molle, Huaycán, Río Seco, San Benito, San José, Antivales, Anchucaya y Huayabal. La peligrosidad, está relacionada por efecto de fuertes lluvias extraordinarias, que pueden producirse (Fenómeno del Niño).

El colector hídrico principal, es el río Lurín, este tiene un recorrido de Noreste a Suroeste, que desemboca en el Océano Pacífico; en años normales, no trae mucha agua, además con el aumento de necesidades de agua, debido al regadío de campos de cultivo y uso de agua para la población creciente, se aprecia fuerte baja del caudal del río, estando en ciertas épocas su cauce seco.

Pero cuando se producen lluvias extraordinarias, en las estribaciones de la Cordillera Occidental, se producen desbordamientos de las aguas del río y de las quebradas, que inundan los terrenos planos, produciéndose también huaycos de diversas magnitudes, e incremento de la erosión de las riberas del río. Se debe tener en cuenta esta peligrosidad de rango alto, debido a que las áreas que puede afectar, se van a seguir urbanizando y también se van realizar obras civiles importantes, relacionadas al turismo.

### **Peligro Medio**

Geomorfológicamente, el distrito de Cieneguilla, está atravesado por el río Lurín; en ambos márgenes del río, se observan cerros de diferente altimetría, encontrándose los cerros más elevados al Noreste del distrito. Las cumbres de estos cerros sirven como límite distrital con los distritos de Ate, Chaclacayo, Villa María del Triunfo y Pachacamác. La roca que conforma estos cerros, son intrusivas del tipo granodiorita, existiendo también rocas volcánicas y sedimentarias; las laderas de estos cerros, son de moderada a fuerte pendiente. Estas laderas mayormente se encuentran tapizadas de arenas eólicas, pero de menor espesor que en las llanuras, encontrándose la roca a poca profundidad de estas arenas.

En las laderas existen muchísimas quebradas y cárcavas de diferentes extensiones y profundidades, estas han sido labradas por erosión de las

aguas de las lluvias. Las rocas se encuentran afectadas por intemperismo supérgeno, también por esfuerzo tectónicos, que han fracturado intensamente a estas rocas. Como consecuencia, las rocas se encuentran disgregadas en bloque de rocas sueltas, de tamaños heterométricos.

Las áreas que involucran el peligro medio, se ubican en las partes bajas de estas quebradas; que debido a lluvias extraordinarias o de sismos intensos, por los cauces de ellas, pueden discurrir huaycos, o caer bloques de rocas o de derrubios. También por las laderas aledañas a estas quebradas, debido al intenso fracturamiento de las rocas, los materiales sueltos pueden producir deslizamientos. Se debe tener en cuenta que ya se están construyendo viviendas en algunas de estas quebradas, que por lo expuesto, podrían ser afectados por estos peligros geológicos.

### **Peligro Bajo**

Las áreas consideradas con peligro geológico bajo en el distrito, están constituidos por las partes más elevadas de los cerros. Las partes altas de las laderas de los cerros que van hasta sus cumbres, presentan pendientes fuertes, son el inicio de las cárcavas y quebradas existentes. Los afloramientos rocosos, aunque están tectonizados y en proceso de disgregación, se presentan estables.

Estos terrenos, están actualmente libres de viviendas, y es poco probable que sean ocupados. Posiblemente en ellos se construyan obras civiles como torres de alta tensión para transmisión de electricidad, torres para transmisión de telefonía de diversas comunicaciones. No presentan mayor severidad de peligros geológicos, como inundaciones, deslizamientos grandes, huaycos u otros que puedan afectarlos.

## REFERENCIAS

- Aki, K. (1957). Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors. *Bulletin Earthquake Research Institute Tokyo University* 25, 415-457.
- Aki, K., & Richards, P. G. (1980), *Quantitative seismology*. San Francisco, EE.UU: W.H. Freeman & Co.
- Alva Hurtado J. E. (2004), "Banco de Datos de Mapas de Isosistas en el Perú", Página web del CISMID – FIC – UNI ([http://www.cismid-uni.org/p\\_acelerograf/index.htm](http://www.cismid-uni.org/p_acelerograf/index.htm)).
- 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.
- Anomohanran, O. (2013). Seismic refraction method: A technique for determining the thickness of stratified substratum. *Am. J. Applied Sci.*, 10, 857-862.
- Atkinson, G., &Boore, D; (2003), "Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, N° 4, pp. 1703-1729.
- Asten M.W. & Henstridge J.D. (1984). Array Estimators and the use of Microseisms for Sedimentary Basin Reconnaissance. *Geophysics*, 49, 1828–183.
- ASTM (2011). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM International*, Designation: D1586-11, pp. 1-9.
- 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.
- Bernal, I. (2000), "Características de la Sismicidad en la Región Sur del Perú", *Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP*, pp. 69 – 80. Lima, Perú.
- Berrocal, J. (1974), "South american Seismotectonics from SAAS data", Thesis Submitted for Degree of Doctor Philosophy in the University of Edinburg.
- Bommer, J. J., (2002), "Deterministic vs. Probabilistic Seismic Hazard Assessment: An Exaggerated and Obstructive Dichotomy", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 6, Special Issue 1, pp. 43 – 73, Imperial College Press.
- Boore, D.; Joyner, W. (1982), "The empirical prediction of ground motion", *Seismological Society of America*, Vol. 72, N° 6, pp. S43-S60.
- Cahill, T.; Isacks, B. (1992), "Seismicity and shape of the subducted Nazca plate", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No B12, p. 17503 -17529.
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proc. IEEE*, 57(8), 1408-1418.
- Castillo J. (1993). *Peligro Sísmico en el Perú* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.
- Chávez J. (2006), "Leyes de Atenuación para Aceleraciones Espectrales en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.
- Cho, I., Tada, T. & Shinozaki, Y. (2004). A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *Geophysics*, 69, 1535-1551.
- CISMID (2005). *Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en 42 distritos de Lima y Callao*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 58, N°5 págs. 1538-1606.
- Deza E. y Carbonell C. (1978), "Regionalización Sismotectónica Preliminar del Perú", IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.

- Dorman, J., Ewing, M. (1962). Numerical inversion of seismic surface wave dispersion data and crust-mantle structure in the New York-Pennsylvania area. *J. Geophys. Res.*, 67, 5227-5241.
- Flores-Estrella, H. (2004). *Método SPAC: Una Alternativa para la Estimación de Modelos de Velocidades en el Valle de México*. (Tesis de Maestría), Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. México.
- Gamarra y Aguilar (2009), "Nuevas Fuentes Sismogénicas para la Evaluación del Peligro Sísmico y Generación de Espectros de Peligro Uniforme en el Perú", XVII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Gutenberg, B. (1945), "Magnitude determination for deep-focus earthquakes", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 35, pp. 117-130.
- Gutenberg, B.; Richter, C. (1956), "Earthquake magnitude: intensity, energy, and acceleration", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 46, pp. 104-145.
- Instituto Geofísico del Perú. (2001), "Catálogo Sísmico del Perú: Versión Revisada y Actualizada". Lima, Perú.
- INGEMMET (1992), "Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica "Boletín N°43 – Hojas: 25-i y 25-j.
- INGEMMET (2015), "Peligros Geológicos en el Área de Lima Metropolitana y la Región Callao".
- International Building code, (2012), International Code Council.
- 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.
- Lermo, J. & F. J. Chavez-Garcia (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1350-1364.
- Macharé, J., Fenton, C., Machette, M., Lavenue, A., Costa, C. and Dart, R., (2003), "Database and Map of Quaternary Faults and Folds of Peru and its Offshore Regions", Open-File Report 03-451, US Geological Survey, 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*, 30(3), 25-30.
- Normas Legales (2006). Norma E.050 Suelos y Cimentaciones. *El Peruano*, pp. 320754-320770.
- Omori, F. (1908). On Micro-Tremors. *Bull. Imperial Earth. Investigation Committee of Tokyo*, 2,1-6.
- Ordaz, M., Aguilar A., Arboleda J: (1999), "Program for Computing Seismic Hazard: CRISIS 2007 Ver 7.6", Institute of Engineering, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pomachagua, O. (2000), "Características Generales de la Tectónica y Sismicidad de Perú", *Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP*, pp. 93 – 104. Lima, Perú.
- Sadigh K., Chang C., Egan J., Makdisi F., Youngs R.R., (1997), "Attenuation Relationship for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data", *Seismological Research Letters*, Volume 68, Number 1, January/February.
- 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.
- SENCICO, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Reglamento Nacional de Edificaciones, "Norma E-030, Diseño Sismo Resistente", 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.
- SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur" Vol 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.
- Scordilis E., (2006), "Empirical Global Relations Converting Ms and Mb to Moment Magnitude", Journal. Seismological, 10, pp 225-236.
- Tada, T., Cho, I., & Shinozaki, Y. (2007). Beyond the SPAC Method: Exploiting the Wealth of Circular-Array Methods for Microtremor Exploration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (6), 2080-2095.
- Tada, T., Cho, I., & Shinozaki, Y. (2010). Analysis of Love-wave components in microtremors. Joint Conference Proceedings, *7th International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) & 5th International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology. 115-124.  
([http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference\\_7th.pdf](http://www.cuee.titech.ac.jp/Japanese/Publications/Doc/conference_7th.pdf)).
- Tavera H. y Buforn E (1998), "Sismicidad y Sismotectónica de Perú", Física de la Tierra, N° 10, pp. 187 – 219. España.
- Tokimatsu, K., Shinzawa, K., and Kuwayama, S. (1992a). Use of short-period microtremors for Vs profiling. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 118(10), 1544-1558.
- Tokimatsu, K., Tamura, S., and Kojima, H. (1992b). Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 118(10), 1529-1543.
- Xia, J., Miller, R.D., and Park, C.B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64(3), 691-700.
- Youngs, R. R., Chiou. S. J., Silva, W. J. and Humprey, J. R. (1997), "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes", *Seismological Research Letters*, Vol. 68, Numb. 1, Pp. 58 – 73, USA.
- Zhao, J., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., et al (2006), "Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 3, pp. 898 – 913, June 2006, doi: 10.1785/0120050122.