

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SÍSMICA DE LA  
CIUDAD DE MOQUEGUA**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de**

**INGENIERO CIVIL**

**LEONARDO RODIN SALAS CACHAY**

**Lima – Perú**

**2003**

## RESUMEN

La presente disertación titulada Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua, surge de la necesidad de tener una herramienta para una planificación ordenada de esta ciudad y tratar de prevenir pérdidas mayores por efectos sísmicos, así como por causas del suelo de fundación. Tiene por ello el propósito de establecer y definir zonas con características geotécnicas similares, evaluando el nivel de peligro al que se encuentran expuesto las edificaciones en cada una de ellas. Con tal motivo en base a un programa de exploración geotécnica, el cual ha consistido en la ejecución de calicatas, ensayos estándar y especiales de laboratorio, ensayos de carga directa in situ y ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de microtrepidaciones.

El contenido de esta investigación ha sido estructurado de tal forma que haya una secuencia entre los diferentes aspectos analizados. Así, en el Capítulo I se presenta un introducción sobre los antecedentes que llevaron a realizar este trabajo, así como los datos generales acerca de la área en estudio en condiciones actuales y los objetivos que busca esta tesis.

Capítulo II se presenta la evaluación del peligro sísmico al que se encuentra expuesto la ciudad de Moquegua. Este análisis se ha realizado utilizando el método probabilístico propuesto por Cornell (1968).

En el Capítulo III se presentan las características geológicas y geomorfológicas regionales y locales para esta ciudad. El Capítulo IV reporta los trabajos de exploración de campo realizados para determinar las características geotécnicas del terreno de fundación del área urbana.

En el Capítulo V se presentan los ensayos de medición de microtrepidaciones realizados para determinar las características dinámicas de los suelos, con los cuales se ha elaborado un mapa de curvas isoperiodos. El Capítulo VI documenta en un mapa de zonificación geotécnica, los resultados de toda la información evaluada en los capítulos y en el Capítulo VII se presentan las conclusiones y recomendaciones alcanzadas en esta investigación.

La evaluación de toda esta información ha permitido definir cuatro zonas geotécnicas en la ciudad de Moquegua, de acuerdo a las características físico mecánicas y dinámicas de los suelos de fundación.

La Zona I está conformada por la parte consolidada de la ciudad. Superficialmente presenta un material de relleno medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas. Debido a las características de amplificación sísmica observados en los registros sísmicos obtenidos en esta zona, para el diseño sismoresistente se recomienda considerar los parámetros sísmicos correspondientes a un Suelo Tipo S2 del RNC.

La Zona II, que abarca las Pampas de Chen Chen, está conformada por estratos de gravas con matriz limosa y arenosa, de compacidad suelta a media. En este sector muestra fuertes amplificaciones, por lo que para el diseño sismo-resistente en esta zona se recomienda considerar los parámetros correspondientes al Suelo Tipo S3 del RNC.

La Zona III ha sido subdivididas en dos subzonas con las siguientes características:

Zona III A, Conformada por el sector llano del área central del CPM San Antonio, así como por la zona mas elevada del cerro El Siglo y los asentamientos humanos El siglo y Mariscal Nieto, terminando en la Quebrada del Pedregal. El terreno de fundación está conformado por un material granular de compacidad media a suelta. Los parámetros de diseño sismo-resistente recomendados para esta zona corresponden al Suelo Tipo S3 del RNC.

Zona III B, Esta zona abarca las dos partes laterales del CPM San Antonio. El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión. Sin embargo, en este sector también se han observado grandes amplificaciones sísmicas (Lermo et al, 2002), por lo que su comportamiento dinámico debe ser caracterizado como el de un Suelo Tipo S2 del RNC..

La Zona IV: Predominantemente abarca el área donde se ha situado el CPM San Francisco. Constituido superficialmente por rellenos y gravas angulosas, arenas medias a finas y limos inorgánicos. Subyaciendo se encuentran areniscas arcósicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro, rígida, con estratificación casi horizontal, que poseen características expansivas. En consecuencia, esta zona presenta las condiciones más desfavorables para ser utilizada como área urbana. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sismo-resistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un Suelo Tipo S3 del RNC.

El mayor peligro al que está expuesta la ciudad de Moquegua es la ocurrencia de eventos sísmicos, que pueden generar movimientos sísmicos bastante intensos, sin embargo, no se debe descartar la posibilidad de precipitaciones pluviales extraordinarias que también pueden generar grandes desastres en las áreas de las torrenteras y quebradas secas que han sido pobladas. Se recomienda que las autoridades realicen un control mas efectivo para ordenar el crecimiento de la ciudad, de tal forma que las edificaciones que se construyan en el futuro sean menos vulnerables ante los peligros naturales.

Se espera que la información contenida en este trabajo de investigación contribuya a conocer mejor el comportamiento geotécnico y sísmico del subsuelo de la Ciudad de Moquegua, de manera que los resultados obtenidos sean aplicados a la mitigación de los desastres causados por los fenómenos naturales, así como par crear en la población una cultura de prevención.

# INDICE

## RESUMEN EJECUTIVO

## AGRADECIMIENTOS

Pág.

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes	1
1.2	Generalidades	2
1.2.1	Ubicación Geográfica	2
1.2.2	Accesibilidad	2
1.2.3	Clima	3
1.2.4	Población y Nivel Socio-Económico	4
1.3	Objetivos del Estudio	5
1.4	Organización del Estudio	6
1.4.1	Recopilación de Información	6
1.4.2	Trabajo de Exploración de Campo	6
1.4.3	Ensayos de Laboratorio	8
1.4.4	Trabajo de Gabinete	8
1.5	Contenido del Estudio	8

### 2. EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE MOQUEGUA

2.1	Introducción	11
2.2	Sismicidad Histórica de la Ciudad de Moquegua	11
2.3	Actividad Sísmica Reciente	16
2.3.1	El Sismo del 23 de Junio del 2001 en la Región Sur Occidental del Perú.	17
2.4	Sismotectónica de la Región Sur Occidental del Perú	17
2.4.1	Fuentes Sismotectónicas	20
2.4.2	Leyes de Atenuación	21
2.5	Determinación del Peligro Sísmico en la Ciudad de Moquegua	23
2.5.1	Fundamentos del Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico	23
2.5.2	Evaluación del Peligro Sísmico	24

### **3. CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS**

3.1	Características Geológicas de la Región Sur Occidental del Perú	35
3.1.1	Estratigrafía	35
3.1.2	Rocas Intrusivas	40
3.1.3	Geología Estructural	41
3.2	Topografía del Área en Estudio	42
3.3	Geología Local del Área de Moquegua – Samegua	42
3.3.1	Geomorfología	42
3.3.2	Geodinámica	43
3.3.3	Estratigrafía Local	43
3.3.4	Aspectos Estructurales	45
3.3.5	Hidrogeología	46

### **4. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA**

4.1	Introducción	49
4.2	Exploración de Campo	49
4.2.1	Excavación de Calicatas	50
4.2.2	Ensayos de Colapso Insitu	50
4.2.3	Ensayos de Refracción Sísmica	51
4.3	Ensayos de Laboratorio	54
4.3.1	Evaluación del Potencial de Expansión	55
4.3.2	Evaluación del Potencial de Colapso	58
4.4	Perfil Estratigráfico	58
4.4.1	El Cercado de Moquegua	58
4.4.2	Centro Poblado Menor San Antonio	59
4.4.3	Chen Chen	60
4.4.4	Centro Poblado Menor Los Angeles	61
4.4.5	Centro Poblado Menor San Francisco	62
4.5	Delimitación del Área de Estudio por Tipos de Suelos	62
4.6	Determinación de la Capacidad Portante del Terreno para Edificaciones de Interés Social	63

### **5. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS SUELOS**

5.1	Introducción	72
5.2	Análisis del Registro Sísmico Obtenido En la Ciudad de Moquegua Durante el Terremoto del 23 de Junio del 2001	72
5.2.1	Tiempo Historia de Aceleraciones	73
5.2.2	Espectros de Respuesta Elástica	73
5.3	Medición de Microtrepidaciones en la Ciudad de Moquegua	74
5.3.1	Descripción del Equipo	75

5.3.2	Procedimiento del Ensayo	75
5.3.3	Evaluación e Interpretación de las Mediciones	76
5.3.4	Definición de Curvas Isoperiodos	76
5.4	Discusión de Resultados	77

## **6. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA**

6.1	Introducción	81
6.2	Características Geotécnicas en Condiciones Estáticas	81
6.3	Características Dinámicas de los Suelos de Fundación	86
6.4	Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua	88

## **VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1	Conclusiones	92
7.2	Recomendaciones	95

## **REFERENCIAS**

96

## **ANEXOS**

- ANEXO I: REGISTRO DE SONDAJES
- ANEXO II: ENSAYOS DE CAMPO
- ANEXO III: ENSAYOS DE LABORATORIO
- ANEXO IV: PERFILES GEOTÉCNICOS Y GEOFÍSICOS
- ANEXO V: REGISTRO DE MICROTREPIDACIONESG
- ANEXO VI: REGISTRO FOTOGRÁFICO

## **PLANOS**

- P – 01: TOPOGRAFÍA DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA
- P – 02: UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS LOCALES
- P – 03: GEOLOGÍA SUPERFICIAL Y GEOMORFOLOGÍA LOCAL
- P – 04: UBICACIÓN DE SONDAJES
- P – 05: TIPOS DE SUELOS A 1 m DE PROFUNDIDAD
- P – 06: UBICACIÓN DE ENSAYOS GEOFÍSICOS
- P – 07: CURVAS ISOPERIODO
- P – 08: ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La ciudad de Moquegua se sitúa en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una zona de alta actividad sísmica, que a través de los tiempos ha soportado la ocurrencia de sismos destructores, con saldos dolorosos por las pérdidas de vidas humanas y pérdidas materiales, como es el caso del último sismo del 23 de Junio del 2001 ocurrido a las 15:33 horas, el cual tuvo una Magnitud  $M_s = 8.2$  en la escala Richter y en la ciudad de Moquegua alcanzó una Intensidad de VII grados en la escala de Mercalli Modificada. El movimiento sísmico afectó las zonas más vulnerables y dejó miles de viviendas destruidas. En general, las viviendas mas afectadas fueron las de Adobe que en su mayoría han colapsado, en menor escala fueron afectadas las edificaciones de albañilería, algunas de las cuales se agrietaron y otras sufrieron fallas en sus tabiquerías, lo mismo ocurrió en edificios de estructuras aporticadas.

En la ciudad de Moquegua, la zona más afectada fue el Centro Poblado Menor San Francisco, donde las viviendas de adobe ubicadas al pie y en la ladera de los cerros colapsaron en su totalidad. En El Cercado y los Centros Poblados Menores de San Antonio y Los Angeles también quedaron destruidas las viviendas de adobe.

Después de la ocurrencia de este desastre, la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto se vio en la necesidad de plantear la reubicación de los damnificados, especialmente del CPM San Francisco, en un área circundante a la ciudad destinada para expansión urbana. Esta zona es la denominada "Pampas de Chen-Chen". Sin embargo, la ocurrencia de daños en ciertos tramos del canal Pasto Grande en el sector Chen Chen y el agrietamiento de las viviendas en el CPM San Antonio, son evidencias de la presencia de suelos expansivos en dichas zonas. En tal sentido, se requería de un análisis detallado del terreno de fundación de la zona de expansión en particular y de la ciudad de Moquegua en general, para identificar y zonificar dichos suelos, y así evitar que las nuevas edificaciones sean afectadas por este comportamiento especial del terreno.

Viendo la impostergable necesidad de desarrollar este estudio, la UNI- FIC-CISMID presentó un programa de investigación denominado "Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua" al concurso de proyectos de investigación convocado por CONCYTEC a través de su programa de apoyo al investigador. Es así que este proyecto de tesis resultó seleccionado y pudo hacerse realidad gracias al financiamiento proporcionado por CONCYTEC y al



invalorable esfuerzo y dedicación del personal del Laboratorio Geotécnico del CISMID. Cabe indicar que dada la importancia de esta tesis, que servirá para crear una cultura de prevención en esta zona sur del Perú, instituciones como la Municipalidad Provincial de Mariscal Nieto-Moquegua, CTAR Moquegua y el Instituto Nacional de Desarrollo contribuyeron en el desarrollo del mismo con un apoyo directo y decidido durante los trabajos de exploración de campo.

La presente disertación tiene como objetivo básico contribuir en la seguridad mínima necesaria del poblador de la ciudad de Moquegua, frente a los fenómenos físicos al que está sometido la región sur del Perú, mediante delimitaciones de zonas mas apropiadas donde habitar o construir sus viviendas, de manera que estos fenómenos causen menos destrucción, evitando pérdidas de vidas humanas, que es lo mas importante, y pérdidas materiales que afectan la alicaída economía de nuestro país.

## **1.2 Generalidades**

### **1.2.1 Ubicación Geográfica**

La ciudad de Moquegua es la capital del distrito de Moquegua, de la Provincia Mariscal Nieto, del Departamento de Moquegua. Se encuentra ubicada en la costa sur del Perú, entre las estribaciones de la cordillera occidental de los andes y la antigua cordillera de la costa.

Delimitan al valle de Moquegua en su extremo norte los cerros Huaracane, Estuquiña y los Angeles. En el Lado Este se ubica los cerros Baúl, Mirador, Lagunillas y Cuesta de Bronce. Por el lado Sur el valle se encajona abruptamente en los materiales del volcánico Toquepala, dando comienzo así al río Osmore el que finaliza en el valle de Ilo. En el extremo Oeste se levantan los cerros Trapiche, Pan de Azúcar y Santa Ana.

La ciudad se ubica alrededor de la coordenada  $70^{\circ}55'54''$  de longitud Oeste y  $17^{\circ}11'23''$  de latitud Sur, con una altitud promedio de 1410 m.s.n.m, con una superficie total de  $3949.04 \text{ km}^2$ , donde la zona de estudio abarca  $33.17 \text{ km}^2$ , de cual el 30% de superficie representa la zona urbana

### **1.2.2 Accesibilidad**

El acceso vía terrestre es por intermedio de un desvío de 5 km. a la altura del km. 1145 de la carretera Panamericana Sur, carretera que conecta la ciudad con Tacna y Arequipa. También tiene acceso a través

de la carretera Moquegua – Puno, la cual a su vez conecta esta ciudad con los distritos de Torata y Carumas de la Provincia Mariscal Nieto. Por intermedio de un desvío de esta carretera, la ciudad de Moquegua tiene conexión con el distrito de Omate, de la provincia general Sánchez Cerro. La ciudad de Moquegua dista 95 km del puerto de Ilo a través de la vía Panamericana Sur.

Además, la ciudad de Moquegua cuenta con un aeropuerto que permite el acceso aéreo, pero en la actualidad no se realizan vuelos comerciales. La Figura 1-1 muestra el plano de ubicación geográfica de la ciudad de Moquegua.

### 1.2.3 Clima

La ciudad de Moquegua tiene un clima cálido y desértico, con días soleados durante todo el año. La temperatura media anual es de 19.5 grados centígrados, variando desde una máxima promedio anual de 25.6 grados entre los meses de Enero a Marzo y una mínima promedio anual de 11 grados centígrados en los meses de Mayo y Junio. La máxima velocidad del viento registrada es de 4 nudos, presentándose generalmente en el mes de Agosto. La dirección predominante del viento es Sur - Sureste.

De acuerdo al análisis de la información meteorológica de la estación de SENAMHI ubicada en el lugar de estudio, se establece que el clima se caracteriza por su luminosidad, con un promedio de 8.7 horas de sol por día y una humedad relativa promedio de 57%.

#### Características Climáticas

Precipitación líquida media anual	15.15 mm.
Humedad relativa promedio anual	57%
Temperatura máxima promedio anual	25.6°C
Temperatura mínima promedio anual	11.0°C
Temperatura media	19.5°C

Sin embargo, en el año de 1993 se registró una intensa precipitación que alcanzó los 100 mm en tres días de lluvias, ocasionando severos daños en las viviendas de adobe y de material rústico, inundando calles y avenidas con una altura de agua de hasta 25 cm.

La temperatura determina que este sector latitudinal sea propicio para el cultivo de frutales y forrajes.

#### 1.2.4 Población y Nivel Socio-Económico

El distrito de Moquegua ubicado en la jurisdicción de la Provincia Mariscal Nieto perteneciente al departamento del mismo nombre presenta los siguientes datos estadísticos.

##### **Datos Generales del Distrito**

Población Censada	35,677
Población por Area	
Urbana	33,350
Rural	2,327
Población por Sexo	
Hombres	18,227
Mujeres	17,450
Tasa de Crecimiento Intercensal 1981-1993	3.30%
Porcentaje de la Población de 15 y más años	68.20%
Tasa de Analfabetismo de la Población de 15 y más años	7.60%
Porcentaje de la Población de 15 y más años con Primaria Completa a más	79.30%

##### **Servicios Básicos de la Vivienda 1993**

Total de Viviendas Particulares	9103
Vivienda que disponen de Abastecimiento de Agua	5716
Viviendas con Alumbrado Eléctrico	6117
Viviendas con Servicio de Desagüe	5262
Porcentaje de Hogares sin Agua, Desagüe, ni Alumbrado	6.30%
Porcentaje de Hogares con al menos un Artefacto Electrodoméstico	87.40%

##### **Indicadores de Trabajo y Empleo 1993**

Población Económicamente Activa (PEA) de 6 y más años	12136
Hombres	8209
Mujeres	3927
Tasa de Actividad Económica de la PEA de 15 y más años	49.30%
Porcentaje de la PEA Ocupada de 15 y más años	
En Agricultura	13.50%
En Servicios	68.20%
Asalariados	53.90%

## Atractivos y Recursos Turísticos

<b>Fiestas Tradicionales</b>	<b>Día/Mes</b>	<b>Lugar</b>
Aniversario de Moquegua	24/11	Moquegua
Fiesta de las Cruces	03/05	Moquegua
Santa Fortunata	14/10	Moquegua

<b>Lugares Turísticos</b>	<b>Dist.(Km)</b>	<b>Ubicación</b>
Cementerio de Sta. Fortunata	-	Moquegua
Las Bodegas	-	Moquegua
Museo Contisuyo	-	Moquegua

### Recursos Turísticos 1994

Hoteles	5
Hostales	10
Restaurantes	18

### 1.3 Objetivos del Estudio

El objetivo de esta disertación es evaluar las características geotécnicas y sísmicas de la ciudad de Moquegua, especialmente de las áreas de expansión urbana destinadas para la reubicación de los damnificados por el terremoto del 23 de Junio de 2001. Este movimiento sísmico ha generado grandes daños en amplias zonas de la ciudad de Moquegua, algunas de las cuales presentan un alto nivel de peligro sísmico por lo cual se ha recomendado su reubicación, sin embargo existen evidencias que hacen sospechar que las áreas seleccionadas para tal fin están conformadas por suelos con características especiales, pues se han reportado daños por problemas de expansión del suelo de cimentación en las edificaciones de las zonas aledañas. En consecuencia, es interés del presente estudio zonificar las áreas competentes para la construcción de edificaciones de interés social y proponer alternativas constructivas para las zonas de suelos menos competentes, a fin de garantizar la estabilidad de dichas estructuras.

Además del estudio de las zonas de expansión, en esta pesquisa se realiza la caracterización geotécnica de toda la ciudad de Moquegua, considerando tanto los aspectos de mecánica como de dinámica de suelos. Los resultados que se obtengan permitirán conocer el nivel de peligro sísmico y de otros fenómenos naturales al que están expuestas las viviendas y obras de infraestructura de esta ciudad, los cuales podrán ser considerados en los planes de reconstrucción y reparación de las edificaciones que han sido afectadas por el último evento telúrico.

En consecuencia, se espera que los resultados de esta tesis contribuyan a disminuir la vulnerabilidad de las edificaciones y obras de infraestructura de la ciudad de Moquegua, garantizando un desarrollo ordenado y sostenible en áreas seguras y de bajo nivel de peligros naturales.

## **1.4 Organización del Estudio**

La elaboración de esta presente tesis ha demandado la realización de una serie de actividades, como son la recopilación de información, exploración de campo, análisis de la información en gabinete y finalmente la elaboración de esta disertación, el cual ha sido realizado en tres etapas para un adecuado tratamiento de la información y orden de trabajo. Seguidamente se describen cada una de estas actividades realizadas.

### **1.4.1 Recopilación de Información**

En esta etapa se ha recopilado toda información disponible relacionada con el presente estudio, tales como: estudios geológicos, cartas geológicas, estudios de mecánica de suelos con fines de cimentación, información de la sismicidad del área de interés, estudios de investigación con fines de microzonificación de la ciudad de Moquegua, base de datos del catastro y planos topográficos a escala 1/10000, entre otros. El análisis de esta información permitió definir un programa de exploración de campo racionalizado, considerando adecuadamente las zonas donde se requería una densificación de la exploración y ensayos apropiados para caracterizar con mayor propiedad la zona de estudio.

### **1.4.2 Trabajo de Exploración de Campo**

La exploración geotécnica de las diferentes áreas de estudio se realizaron en dos etapas, durante las cuales se realizaron las siguientes actividades:

**Primera Etapa:** En esta etapa permitió obtener un levantamiento detallado de la geomorfología y geología superficial de todas las zonas involucradas. Así mismo, se realizó una campaña de exploración geotécnica mediante la excavación de calicatas de 4.00 m de profundidad y ensayos de colapso in situ. La ubicación y el número de sondajes realizados se indican en la Tabla 1-1.

**Tabla 1-1: Exploración Geotécnica Realizada en la Primera Etapa del Proyecto**

<b>Primera Etapa</b>		
<b>Ubicación</b>	<b>Calicatas</b>	<b>Ensayo de Colapso In Situ</b>
Chen – Chen	28	5
CPM San Antonio	10	2
CPM San Francisco	2	-
Los Angeles	7	-
Moquegua	3	-
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>7</b>

**Segunda Etapa:** En base a la primera etapa se considero hacer una campaña de densificación de sondajes para poder definir con mayor criterio las diferentes zonas geotécnicas identificadas. Con este fin se han ejecutado un total de 27 calicatas de hasta 4 metros de profundidad, cuya distribución se indica en la Tabla 1-2. Paralelamente se llevó a cabo la campaña de ensayos geofísicos de medición de microtrepidaciones y de refracción sísmica, los cuales permitirán conocer la potencia de los diferentes estratos superficiales encontrados y sus características dinámicas. La Tabla 1-2 muestra también los ensayos geofísicos realizados en cada zona.

**Tabla 1-2: Exploración Geotécnica Realizada en la Segunda Etapa del Proyecto**

<b>Segunda Etapa</b>			
<b>Ubicación</b>	<b>Calicatas</b>	<b>Microtrepidaciones</b>	<b>Refracción Sísmica</b>
Chen – Chen	-	28	640 m
CPM San Antonio	10	25	
CPM San Francisco	5	31	
Los Angeles	-	8	
El Cercado	12	58	
<b>TOTAL</b>	<b>27</b>	<b>150 ptos</b>	<b>640 m</b>

### **1.4.3 Ensayos de Laboratorio**

En los trabajos de exploración de campo se obtuvieron muestras de suelos a los cuales se les realizaron ensayos estándar para su clasificación y ensayos especiales para evaluar su comportamiento frente a condiciones de saturación con los cuales se esbozo una caracterización geotécnica. Los ensayos estándar de mecánica de suelos en parte se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del INADE, en la ciudad de Moquegua. Los ensayos estándar y los ensayos especiales de mecánica de suelos fueron realizados en su mayoría en el Laboratorio Geotécnico del CISMID.

### **1.4.4 Trabajo de Gabinete**

El trabajo de gabinete consistió en el análisis e interpretación de los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio y en el campo. En esta disertación se documenta la información reportada en los ensayos y el análisis de la información en su totalidad, con lo cual se ha realizado la zonificación integral de la ciudad de Moquegua. Dentro de las actividades realizadas en el trabajo de gabinete se pueden mencionar las siguientes:

- Análisis y evaluación de la información recopilada
- Elaboración de los Mapas Geomorfológicos y de Geología Superficial.
- Elaboración de perfiles estratigráficos
- Interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio  
Caracterización geotécnica de las diferentes zonas de estudio, donde se incluye las zonas urbanas de El Cercado, los Pueblos Jóvenes, los Centros Poblados Menores de San Antonio, San Francisco y Los Angeles, y la nueva área de expansión urbana de Chen – Chen.
- Elaboración del mapa de zonificación geotécnica del área en estudio.
- Evaluación del comportamiento dinámico del terreno para cada una de las zonas definidas

## **1.5 Contenido del Informe**

La presente disertación documenta todas las actividades realizadas para elaborar la zonificación geotécnica sísmica de la ciudad de Moquegua. El contenido de esta investigación ha sido estructurado de tal forma que haya una secuencia entre los diferentes aspectos analizados. Así, en el Capítulo II se

presenta la evaluación del peligro sísmico al que se encuentra expuesta la ciudad de Moquegua. Este análisis se ha realizado utilizando el método probabilístico propuesto por Cornell (1968).

En el Capítulo III se presentan las características geológicas y geomorfológicas regionales y locales para esta ciudad. El Capítulo IV reporta los trabajos de exploración de campo realizados para determinar las características geotécnicas del terreno de fundación del área urbana.

En el Capítulo V se presentan los ensayos de medición de microtrepidaciones realizados para determinar las características dinámicas de los suelos, con los cuales se ha elaborado un mapa de curvas isoperíodos. El Capítulo VI documenta en un mapa de zonificación geotécnica, los resultados de toda la información evaluada en los capítulos y en el Capítulo VII se presentan las conclusiones y recomendaciones alcanzadas en esta investigación.



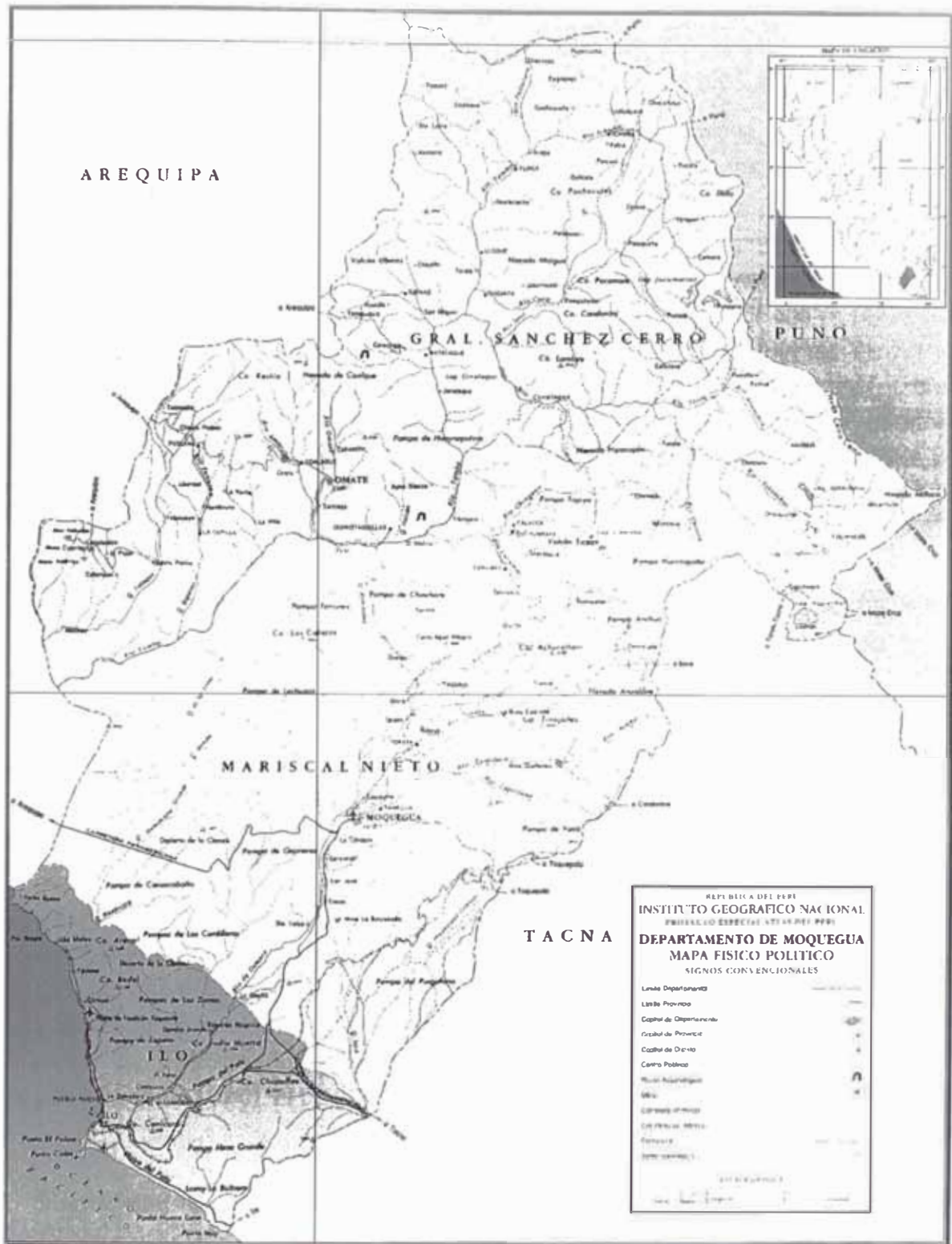


Figura 1-1: Ubicación Geográfica de la Ciudad de Moquegua.

## **CAPÍTULO 2**

# **EVALUACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE MOQUEGUA**

### **2.1 Introducción**

La ciudad de Moquegua se encuentra ubicada en una zona de alta actividad sísmica y a lo largo de su historia ha sufrido los efectos de devastadores terremotos. La principal fuente de generación sísmica lo constituye la zona de convergencia de las placas tectónicas a lo largo del litoral, donde la placa de Nazca subduce a la placa Sudamericana. Existen además fuentes sísmicas superficiales en la zona continental, constituidos mayormente por fallas geológicas activas como el sistema de fallas de Incapuquio, que pueden generar movimientos sísmicos de moderada magnitud, pero que por la proximidad a las zonas urbanas pueden generar daños de consideración a las edificaciones y obras de ingeniería.

Debido a la escasa información instrumental de movimientos sísmicos registrados en esta región, donde solamente se cuenta con el acelerograma obtenido en la ciudad de Moquegua durante el terremoto del 23 de Junio del 2001, es necesario contar con parámetros de diseño sísmico confiables para analizar la vulnerabilidad de las estructuras construidas en esta región. Una herramienta que permite estimar los valores de aceleraciones máximas esperadas es el análisis de peligro sísmico probabilístico, el cual es usado en este estudio para determinar este parámetro considerando periodos de exposición sísmica (vida útil de las estructuras) de 50 y 100 años.

La metodología usada en este análisis está basada en el trabajo de Cornell (1968), quien propuso un trabajo pionero en el análisis de peligro sísmico, considerando la aleatoriedad de la ocurrencia de terremotos en el espacio y en el tiempo. Este método fue modificado e implementado en el programa RISK por McGuire (1976), el cual es utilizado en el presente estudio.

### **2.2 Sismicidad Histórica de la Ciudad de Moquegua**

Debido a su ubicación próxima a la zona de subducción de las placas de Nazca y Continental, la ciudad de Moquegua ha sido afectada por muchos movimientos sísmicos desde la antigüedad. El Dr. Enrique Silgado Ferro, en su publicación "La Historia de los Sismos más Notables Ocurridos en el Perú" (1978), presenta una relación bastante completa de los terremotos históricos

reportados desde la época de la conquista, de los cuales se han identificado los siguientes para el área en estudio:

**Entre los años de 1471 – 1490**, gran terremoto que destruyó el primitivo asiento de la ciudad de Arequipa, fue la época del Inca Túpac Yupanqui, en la cual perecieron todos sus habitantes y hubo erupción del volcán Misti, alcanzando una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli.

**Entre los años de 1513 – 1515**, ocurrieron grandes sismos acompañados de formidables deslizamientos de tierra de algunos cerros altos, en la costa el mar sobrepasó muchas veces la línea de la playa. En Arequipa alcanzó intensidades de VIII en la Escala Modificada de Mercalli

**22 de Enero de 1582**, a las 11:30 de la mañana un terremoto destruyó la ciudad de Arequipa, pereciendo mas de 30 personas entre los escombros. El movimiento sísmico alcanzó una intensidad de X en la Escala Modificada de Mercalli en la zona de Socabaya y IX en Arequipa. El movimiento se percibió también en Lima.

**En el año de 1590**, un fuerte sismo sentido en casi toda la Costa del Sur del Perú destruyó el pueblo de Camaná, generando la salida del mar y el represamiento del río.

**19 de Febrero de 1600**, a las 05:00 ocurrió un fuerte sismo causado por la explosión del volcán Huaynaputina (Omate). La lluvia de ceniza oscureció el cielo de la ciudad de Arequipa y se desplomaron todos los edificios con excepción de los más pequeños. El movimiento alcanzó una intensidad de XI en la Escala Modificada de Mercalli.

**24 de Noviembre de 1604**, a las 13:30 horas un gran movimiento sísmico destruyó las ciudades de Arequipa y Arica. Un tsunami destruyó la ciudad de Arica y el puerto de Pisco. Como consecuencia del Tsunami murieron 23 personas en Arica. El movimiento tuvo una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna y Arica.

**31 de Marzo de 1650**, a las 14:00 horas ocurrió un terremoto en el Cuzco que dejó la ciudad en ruinas. Se produjeron grandes deslizamientos en Pisac y Paucartambo, donde el movimiento alcanzó una intensidad de IX en la Escala Modificada de Mercalli. El movimiento fue sentido hasta Lima.

**20 de Octubre de 1687**, a las 06:30 un gran movimiento sísmico ocurrió en la ciudad de Arequipa causando serios daños en templos y viviendas. A causa de este movimiento se produjo un agrietamiento de muchos kilómetros de extensión entre Ica y Cañete. En Aplao y Siguanaco tuvo una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli.

**22 de Agosto de 1715**, a las 19:00 horas. Sismo destructor en el Sur. En Arequipa averió casa, quedando muchas inhabilitadas. El viajero francés Le Barbinais Le Gentil que había llegado a comienzos de Julio al puerto de Arica decía que hubo un temblor tan extraordinario que se hizo sentir en 200 leguas a la redonda, trastornando Arica, Tacna, Moquegua, Arequipa y otros pueblos.

**10 de Febrero de 1716**, terremoto en el pueblo de Torata en Moquegua, que causó gran mortandad, salvándose solo el cura que había salido al campo a administrar sacramentos.

**27 de Marzo de 1725**, conmoción en toda la Costa Sur del Perú debido a un gran sismo. Sufrió daños el pueblo de Camaná, saliéndose el mar.

**8 de Octubre de 1831**, a las 21:15 horas ocurrió un temblor muy fuerte en Tacna, Arica, Moquegua y en el interior del departamento de Arequipa. En Arica resultaron varios muertos y heridos como consecuencia del desplome de varias casas. Sentido en Sucre, Oruro y en otros lugares de Bolivia.

**18 de Setiembre de 1833**, a las 05:45 horas un movimiento sísmico redujo a escombros parte de la ciudad de Tacna y causó daños en Moquegua, Arequipa, Sama, Arica, Torata, Locumba e Ilabaya. Dejó un saldo de 18 muertos y 25 heridos. Sentido en La Paz, Cochabamba y Bolivia.

**13 de Agosto de 1868**, a las 16:45 ocurrió un terremoto en la región sur del Perú que alcanzó una intensidad de grado XI y fue acompañado de un tsunami. El historiador Dr. José Toribio Polo se refiere a este sismo como uno de los mayores que se hayan registrado en el Perú desde su conquista. Las observaciones macro sísmicas indicaron que el epicentro del terremoto estuvo cerca del puerto de Arica.

El movimiento se percibió hasta unos 1,400 km al NW (Samanco, Perú), a una distancia igual hacia el Sur (Valdivia, Chile), y hasta unos 224 km al Este en dirección a Cochabamba, Bolivia. El radio del área más conmovida abarcó como unos 700 km<sup>2</sup>.

En Arequipa se cayeron la mayor parte de los templos, el portal nuevo, el local del Cabildo y muchos establecimientos públicos y privados. La Catedral quedó en ruinas. Según testigos la tierra crujía y ondulaba siendo difícil permanecer en pie. Sufrieron otras graves ruinas las ciudades de Moquegua, Torata, Tacna y Arica. Las estadísticas de la época señalan que como consecuencia del terremoto murieron más de 180 personas en todo el Sur y unas 300 en Arica.

**03 de Noviembre de 1869**, a las 19:30 horas se produjo un fuerte temblor local en Arequipa que causó deterioros en los edificios, alcanzando una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

**09 de Mayo de 1877**, a las 20:28 un violento movimiento sísmico sacudió las poblaciones de Ilo, Mollendo, Arica y otras. Se produjo un tsunami que inundó el puerto de Ilo y destruyó parte del ferrocarril. En la ciudad de Arica el mar avanzó más de 600 metros. Esa misma noche se produjeron como 100 réplicas. La ola sísmica originada por este sismo se extendió casi por todo el Pacífico, llegando hasta las costas de Nueva Zelanda y Yokohama en Japón.

**23 de Enero de 1878**, terremoto sentido en Arequipa y Tacna, cayeron varias casas en el antiguo Tarapacá. El oleaje marino producido por esta conmoción inundó los pueblos costeros del Sur.

**04 de Mayo de 1906**, a las 19:36 se produjo un fuerte temblor en Mollendo, generando el derrumbe de casas en la ciudad de Tacna. Se sintió fuertemente en la ciudad de Arica y aún en Iquique.

**28 de Julio de 1913**, a las 01:40 ocurrió un movimiento sísmico que afectó gran parte de la costa sur situada entre Chala y Mollendo, causando roturas de tres cables submarinos frente a la costa, lo que fue atribuido a un deslizamiento de un talud submarino.

**06 de Agosto de 1913**, a las 17:13 un terremoto destruyó la ciudad de Caravelí, produciendo el desplome de todos los edificios de dicha ciudad y derrumbes de las laderas del valle. En Caravelí y Chuquibamba alcanzó una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli y en Ocoña y Caylloma una intensidad de VI.

**11 de Octubre de 1922**, a las 09:50 un fuerte sismo que causó daños considerables en Arequipa, Caravelí y Mollendo. Fue sentido fuertemente en Chala, Acarí, Puquio, Palpa, Ica y Cañete. En Arequipa y Mollendo se sintió con una intensidad de VI de la Escala Modificada de Mercalli.

**11 de Octubre de 1939**, a las 09:51 horas, el observatorio sismológico de Lima, registraba un movimiento sísmico proveniente de unos 650 km al SE de Lima. Las comunicaciones venidas del Sur informaban que el pueblo de Chuquibamba, situado en el valle del río Majes había sido afectado. Su iglesia, la Cárcel y la Municipalidad sufrieron graves daños y con desplome de muchas casas. El sismo causó otros daños en los edificios de las ciudades de Arequipa y Moquegua. Con gran intensidad se sintió en las poblaciones de Puquio, Quicacha, Palpa, en los puertos de Chala y Mollendo. El movimiento alcanzó una intensidad de VII en Chuquibamba y en Arequipa y Mollendo alcanzó una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

**24 de Agosto de 1942**, a las 17:51 horas. Terremoto en la región limitrofe de los departamentos de Ica y Arequipa, situada entre los paralelos 14° a 16° Latitud Sur. El movimiento alcanzó una Intensidad de grado IX MMI, y fue sentido en un área de unos 18,000 km<sup>2</sup>, donde ocurrió gran destrucción. Murieron 30 personas por los desplomes de las casas habitación y 25 heridos por diversas causas. Fue sentido con intensidad III - IV de la misma escala en un área elíptica aproximada de unos 408,000 km<sup>2</sup>, la cual comprendía el Norte de la ciudad de Huaraz, al NE Cerro de Pasco y Oxapampa, al Este Cusco y al Sur Moquegua.

**11 de Mayo de 1948**, las 03:56 horas. Un fuerte movimiento sísmico en la región sur afectó parte de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Los efectos destructores fueron máximos dentro de un área aproximada de 3,500 km<sup>2</sup>, dejando un saldo 1 muerto y 66 heridos. En la ciudad de Moquegua se sintió con una intensidad de VII y en Arequipa con intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli.

**20 de Julio de 1948**, a las 06:03 horas. Sismo ligeramente destructor en las poblaciones de Caravelí y Chuquibamba departamento de Arequipa, intensidad VI – VII MMI. Sentido en Lima (intensidad II), en Arequipa, Moquegua (intensidad III) y en Ayacucho al Este.

**3 de Octubre de 1951**, a las 06:08 horas ocurrió un fuerte temblor en el Sur. En Tacna se cuartearon los Muros de una construcción moderna de concreto y se produjo el derrumbe de una antigua construcción de adobe. Intensidad VI MMI. Fue sentido en Moquegua con una intensidad de V y fuertemente en la costa al Sur de la frontera con Chile.

**26 de Febrero de 1952**, a las 06:31 horas se sintió un prolongado y suave movimiento ondulatorio en el Cusco, donde provocó fuertes desprendimientos del estuco de varias casas. Generó alarma en la ciudad de Arequipa. Fue sentido también en los pueblos de Paruro, Anta, Izcuchaca, Moquegua y La Paz, Bolivia.

**15 de Enero de 1958**, a las 14:14 horas. Terremoto en Arequipa que causó 28 muertos y 133 heridos. Intensidad ligeramente superior al grado VII MMI. El movimiento fue sentido desde Chíncha (paralelo 11°) hasta Tarapacá, Chile (paralelo 21°) y hacia el Este, en Cusco, Puno y en otras localidades del Altiplano.

**19 de Julio de 1959**, a las 10:07 horas. Intenso y prolongado movimiento sísmico sentido en Arequipa, Moquegua, Cusco, Puno, Tacna y en el Norte de la República de Chile hasta Antofagasta. Ocasionó algunos daños en las torres de los templos de Moquegua, rotura de las redes de distribución de agua potable en Arequipa.

**13 de Enero de 1960**, a las 10:40 un fuerte terremoto en el departamento de Arequipa que dejó un saldo de 63 muertos y centenares heridos. El pueblo de Chuquibamba quedó reducido a escombros, siendo igualmente destructor en Caravelí, Cotahuasi, Omate, Puquina, Moquegua y la ciudad de Arequipa. En el área epicentral la intensidad fue de grado VIII en la escala MSK. En Lima fue sentido con intensidad III y en la ciudad de la Paz con intensidad de III – IV.

**09 de Marzo de 1960**, a las 18:54 se produjo una violenta réplica del terremoto del 13 de Enero, en la ciudad de Arequipa se cayeron las cornizas removidas. Este sismo fue sentido en Puno, en los Puertos de Matarani y Mejía tuvo una intensidad de V en la Escala Modificada de Mercalli. En la ciudad de Arequipa alcanzó una intensidad de VIII.

**24 de Enero de 1964**, a las 04:00 se produjo un sismo en el sur del Perú. Este sismo tuvo una intensidad de VI en la Escala Modificada de Mercalli en la ciudad de Arequipa, y en Mollendo y Ubinas alcanzó una intensidad de V.

**16 de Febrero de 1979**, a las 05:08 un fuerte terremoto sacudió el departamento de Arequipa, ocasionando algunas muertes y muchos heridos. Este sismo produjo severos daños en las localidades de Chuquibamba y pueblos del valle de Majes. Alcanzó una intensidad máxima de VII en la escala MSK, y en la ciudad de Arequipa tuvo una intensidad de VI en la misma escala.

**23 de Junio de 2001**, a las 15:33 horas un terremoto destructor afectó el sur del Perú, particularmente los departamentos de Moquegua, Tacna y Arequipa. Las localidades más afectadas por el terremoto fueron las ciudades de Moquegua, Tacna, Arequipa, Valle del Tambo, Caravelí, Chuquibamba, Ilo y Camaná por efecto de un tsunami. En la zona epicentral este movimiento alcanzó una intensidad de VIII en la Escala Modificada de Mercalli.

### **2.3 Actividad Sísmica Reciente**

La actividad histórica muestra que en épocas recientes la ciudad de Moquegua ha estado expuesta a un gran número de movimientos sísmicos moderados, que han generado niveles de daños leves a moderados. Sin embargo la alta actividad sísmica de esta región hacía evidente la existencia de un silencio sísmico de más de 100 años para movimientos de gran magnitud. Es así que el 23 de Junio del 2001 se produce un fuerte terremoto que tuvo una magnitud momento de Mw 8.4 en la escala de Kanamori, el cual generó un gran desastre particularmente en la ciudad de Moquegua. Este evento se constituye así en uno de los más grandes y catastróficos registrados en el último siglo, demostrándonos el alto nivel de peligro sísmico al que se encuentra expuesta la región sur occidental del Perú.

### **2.3.1 *El Sismo del 23 de Junio del 2001 en la Región Sur Occidental del Perú***

El 23 de Junio del 2001, a las 3:33 de la tarde en tiempo local ocurrió un terremoto en la región sur del Perú. El epicentro de este evento está localizado a 16.15° de la Latitud Sur y 73.40° de Longitud Oeste, el cual está ubicado a 82 Km al noroeste de la ciudad de Ocoña, en la zona de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana. De acuerdo a la evaluación realizada por el Geological Survey de Estados Unidos (USGS) la magnitud revisada de este evento alcanzó el valor de Mw 8.4 (Magnitud Momento o Magnitud de Kanamori), y según el Instituto Geofísico del Perú (IGP) el terremoto tuvo una magnitud Ms 7.9 en la escala de Richter. La Figura 2-1 muestra la localización del epicentro y la distribución de réplicas registradas durante este evento.

Este terremoto ocasionó daños severos en las ciudades de Ocoña, Camaná, Ilo, Moquegua, y partes de la ciudad de Tacna, asimismo, ocasionó daños moderados en la ciudad de Arequipa y poblaciones aledañas, así como en las ciudades de Arica e Iquique en el norte de Chile.

Los daños en edificaciones, puentes y carreteras son variados en la región, algunos de los cuales reflejan claramente la influencia de las condiciones locales del terreno. Los daños en edificaciones adecuadamente construidas son principalmente no estructurales, y la mayoría de daños estructurales han ocurrido en las edificaciones de adobe y de albañilería no confinada o no reforzada adecuadamente. La ciudad mas afectada fue Moquegua, donde alrededor del 80% de las edificaciones de adobe, por lo general bastante antiguas, han colapsado. Según Defensa Civil, el número de muertos por este desastre asciende a 104 y cerca de 4000 personas heridas. En la región afectada, un total de 59,000 viviendas fueron dañadas o destruidas por este terremoto. La Figura 2-2 presenta un mapa de isosistas que muestra la distribución de daños registrados en esta región.

## **2.4 Sismotectónica de la Región Sur Occidental del Perú**

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 Sudamérica. 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



las dos placas convergentes cuya resultante más notoria precisamente es el proceso orogénico contemporáneo constituido por los Andes.

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:

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

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 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, aún cuando existe cierta controversia debido a la ausencia de actividad sísmica entre los 300 y 500 Km de profundidad (Berrocal et al, 1975).

El régimen de esfuerzo regional tectónico parece ser predominantemente compresional, normal a las líneas de la Costa y a la dirección de las Cordilleras. La parte occidental del área de estudio está constituida por varias unidades tectónicas de diferentes grados de deformabilidad, debido a su diferente litología y época de formación. La unidad de deformación Precambriana no presenta actividad sísmica, mientras que la unidad de deformación Paleozoica presenta actividad sísmica de profundidad superficial a intermedia, tal como se observa en la zona de Huaytapallana cerca a Huancayo, así como en Cusco y en Abancay

El proceso de colisión de la placa de Nazca y la placa continental Sudamericana es causante de todos los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente, dentro de los cuales se puede mencionar 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 Sudamericana y de Nazca, siendo el primero un margen continental y el segundo oceánico. 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 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.

Para visualizar la actividad sísmica de la región en estudio y su correlación con la tectónica regional, en la Figura 2-3 se presenta el Mapa Sismotectónico del Perú donde se indica la zona de estudio. En este mapa 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 1471-2000, con representación de la localización, magnitud y profundidad focal de los sismos.

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.

Al considerar las fuentes de sismos que puedan ser significativos para la intensidad del movimiento en el área de estudio, es importante tener en cuenta las diferencias fundamentales en las características de atenuación asociadas con los sismos de subducción y los sismos superficiales. En general, los sismos superficiales se atenúan con mayor rapidez que los sismos de subducción. Consecuentemente, mientras es importante considerar las fuentes de sismos de subducción, también es necesario tomar en consideración las fuentes más cercanas de sismos continentales superficiales la zona en estudio.

#### **2.4.1 Fuentes Sismotectónicas**

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 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 continua 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 el presente estudio se han utilizado las fuentes sismogénicas establecidas en el estudio de evaluación del peligro sísmico en el Perú (Castillo, 1993), según el cual, las fuentes sismogénicas aplicables a la zona de estudio, se presentan en las Figuras 2-4 y 2-5.

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, por lo que pueden distinguirse fuentes de subducción superficial (F3, F4 y F5 en la Figura 2-4), fuentes de subducción intermedia y una fuente de subducción profunda (F15, F16, F17, F19 y F20 en la Figura 2-5). Las fuentes de subducción superficiales, intermedias y profundas tienen profundidades focales promedio de 50, 100 y 600 Km respectivamente.

Las fuentes F8, F9, F11 y F12 (Figura 2-4) están asociadas a la sismicidad regional andina y presentan profundidades focales superficiales, sin estar asociadas a fallas activas. La Tabla 2-1 presenta las coordenadas geográficas de las fuentes sismogénicas de subducción superficial y continentales y la Tabla 2-2 presenta las coordenadas para las fuentes de subducción intermedias y profundas. Los parámetros sismológicos determinados para estas fuentes utilizando el catálogo sísmico de IGP actualizado hasta el año 2000, se presentan en la Tabla 2-3

#### **2.4.2 Leyes de Atenuación**

La aceleración máxima que un sismo futuro puede generar en una localidad determinada depende no solo de su magnitud y de la distancia entre el foco y el sitio bajo consideración, sino que además depende de la atenuación con la distancia y de las condiciones locales en el sitio de interés. La atenuación depende de dos fenómenos principales llamados atenuación geométrica y atenuación mecánica. La atenuación geométrica se refiere al proceso de dispersión de la energía a medida que se aleja de la fuente y la atenuación mecánica involucra el proceso de fricción intergranular que se origina en la transmisión del estado de esfuerzos. Dadas las dificultades físico matemáticas que impone el proceso de atenuación, se han recurrido a la interpretación semi-empírica de datos de aceleración registrados a diferentes distancias

focales para magnitudes conocidas, estableciéndose una expresión de la forma siguiente:

$$a = b_1 e^{b_2 M} (R + b_3)^{-b_4}$$

donde:

- a = aceleración horizontal máxima en cm/seg<sup>2</sup>
- b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub>, b<sub>4</sub> = constantes obtenidas por regresión
- M = magnitud en función de las ondas superficiales
- R = distancia epicentral en kilómetros.

En el Perú es evidente la escasez de datos de registros de aceleraciones. Los pocos datos que se tienen son de la Ciudad de Lima y fueron obtenidos de sismos generados en la zona de subducción. No existe información de eventos generados en la zona continental, sin embargo es notorio que la atenuación del movimiento sísmico es marcadamente diferente que la de los sismos de subducción. En consecuencia, se han utilizado dos leyes de atenuación de aceleraciones, la primera es la propuesta por Casaverde y Vargas (1980), la que ha sido empleada para las fuentes asociadas al mecanismo de subducción. Esta ley está basada en los registros acelerográficos de las componentes horizontales de diez sismos peruanos registrados en Lima y alrededores, y su expresión es la siguiente:

$$a = 68.7 e^{0.8 M_s} (R + 25)^{-1.0}$$

donde:

- a = es la aceleración en cm/seg<sup>2</sup>
- M<sub>s</sub> = es la magnitud en función de las ondas superficiales
- R = es la distancia hipocentral en Km.

La segunda ley de atenuación utilizada es la propuesta por McGuire (1974) para la costa Oeste de los Estados Unidos y ha sido empleada para las fuentes asociadas a sismos continentales. Esta ley tiene la forma:

$$a = 472 * 10^{0.28 M_s} (R + 25)^{-1.3}$$

que expresada en forma logarítmica resulta:

$$\ln a = 6.156 + 0.64 M_s - 1.30 \ln (R+25)$$

donde:

- a = aceleración en cm/seg<sup>2</sup>  
Ms = magnitud de las ondas de superficie  
R = distancia hipocentral en Km.

## 2.5 Determinación del Peligro Sísmico en la Ciudad de Moquegua

### 2.5.1 Fundamentos del Análisis de Peligro Sísmico Probabilístico

El peligro sísmico se define por la probabilidad de que en un lugar determinado ocurra un movimiento sísmico de una intensidad igual ó mayor que un valor fijado. En general, se hace extensivo el termino 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.

La ocurrencia de un evento sísmico es de carácter aleatorio y la Teoría de las Probabilidades es aplicable en el análisis del riesgo de su ocurrencia. Aplicando esta teoría se puede demostrar que si la ocurrencia de un evento A depende de la ocurrencia de otros eventos E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>,.....E<sub>n</sub>, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos; entonces, de acuerdo al teorema de la "Probabilidad Total" se tiene para la probabilidad de ocurrencia de A:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/E_i) * P(E_i)$$

donde P (A/E<sub>i</sub>) es la probabilidad condicional que A ocurra, dado que E<sub>i</sub> ocurra.

La intensidad generalizada (I) de un sismo en un 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<sub>S</sub>(s) y f<sub>R</sub>(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≥i) y está dada por:

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

Esta es la expresión que resume la teoría desarrollada por Cornell (1968) para analizar el peligro sísmico. La evaluación de esta integral es efectuada por el programa de cómputo RISK desarrollado por McGuire (1976) en el cálculo del peligro sísmico.

El riesgo anual es finalmente calculado asumiendo que los sismos siguen la relación de Poisson (McGuire, 1976) mediante la siguiente ecuación:

$$RISK_{\text{anual}} = 1 - e^{-EXP_{\text{anual}}}$$

El nivel de excedencia se expresa de la manera siguiente:

$$RISK = 1 - e^{-\frac{t}{Ry(a)}}$$

donde:

- t: periodo de exposición sísmica o vida útil de la estructura
- Ry(a): periodo de retorno promedio en años de un sismo con intensidad de movimiento "a".

En el presente estudio se considera el 10% de nivel de excedencia para 50 y 100 años de vida útil (t) que corresponden a 475 y 950 años de periodo de retorno respectivamente.

## 2.5.2 Evaluación del Peligro Sísmico

Para la evaluación del peligro sísmico en la ciudad de Moquegua se ha determinado probabilísticamente los valores de aceleraciones máximas esperadas en una malla de puntos que cubre la zona donde se ubica esta ciudad. Las coordenadas de los puntos analizados y los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 2-4. La Figura 2-6 muestra la distribución de aceleraciones máximas esperadas en el área de estudio para un periodo de exposición sísmica de 50 años, con una probabilidad de excedencia de 10%. La Figura 2.7 muestra las aceleraciones máximas correspondientes para 100 años de exposición sísmica.

Se observa que para 50 años de exposición sísmica y 10% de excedencia, el valor de la aceleración máxima esperada para la ciudad de Moquegua es de 0.41g y para 100 años de exposición sísmica la aceleración máxima esperada alcanza un valor de 0.51g.

Los valores de aceleraciones máximos determinados deben considerarse como valores medios esperados en suelo firme, donde no se considera la influencia de las condiciones locales del suelo, ni los efectos de la interacción suelo-estructura. La respuesta estructural de las obras de ingeniería derivada por métodos espectrales deberá considerar, a partir de los valores de aceleración propuestos, la amplificación estructural y las reducciones por ductilidad, amortiguamiento y los coeficientes de seguridad de diseño

**Tabla 2-1: Coordenadas Geográficas de las Fuentes de Subducción Superficial y de las Fuentes Continentales**

FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS				
FUENTE 3	-81.17	-9.00		-79.27	-7.90
	-77.00	-14.80		-75.84	-13.87
FUENTE 4	-77.00	-14.80		-75.84	-13.87
	-74.16	-17.87		-73.00	-16.53
FUENTE 5	-74.16	-17.87		-73.00	-16.53
	-71.85	-19.87		-69.21	-19.00
	-71.85	-22.00		-69.21	-22.00
FUENTE 8	-75.84	-13.87		-74.76	-13.13
	-73.00	-16.53		-71.41	-14.67
FUENTE 9	-73.00	-16.53		-71.41	-14.67
	-69.71	-18.67		-68.12	-16.13
FUENTE 11	-79.10	-5.20		-75.10	-4.33
	-76.34	-10.67		-74.17	-9.33
	-74.76	-13.13		-72.48	-11.40
FUENTE 12	-74.76	-13.13		-72.48	-11.40
	-68.12	-16.13		-67.76	-13.80



**Tabla 2-2: Coordenadas Geográficas de las Fuentes de Subducción Intermedias y Profundas.**

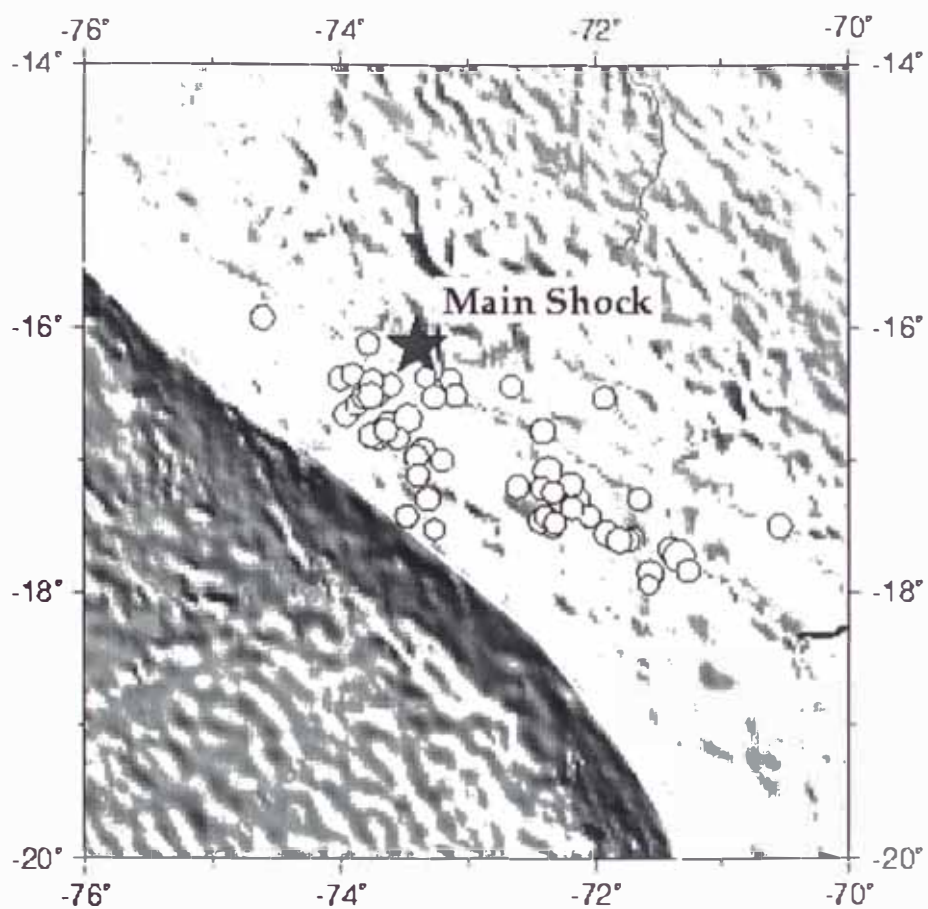
FUENTES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS				
FUENTE 15	-79.80	-8.13		-77.17	-6.53
	-76.38	-14.30		-73.86	-12.46
FUENTE 16	-76.38	-14.30		-73.86	-12.46
	-73.28	-16.87		-71.21	-14.40
FUENTE 17	-73.28	-16.87		-71.21	-14.40
	-70.86	-18.80		-68.93	-15.73
	-70.38	-22.00		-67.98	-22.00
FUENTE 19	-77.17	-6.53		-75.27	-5.33
	-73.86	-12.46		-72.03	-11.13
FUENTE 20	-72.31	-6.67		-71.00	-6.33
	-71.14	-11.30		-69.69	-10.93

**Tabla 2-3: Parámetros Sismológicos de las Fuentes Sismogénicas**

FUENTE	M <sub>min</sub>	M <sub>max</sub>	TASA	BETA	PROF. (Km)
F3	3.0	8.0	7.22	1.16	30, 60
F4	3.0	8.2	3.80	1.19	40, 60
F5	3.0	8.2	4.70	1.20	60
F8	3.0	7.0	0.82	1.27	65
F9	3.0	7.5	1.07	0.88	60
F11	3.0	7.1	8.21	1.13	40, 60
F12	3.0	7.1	0.95	1.20	50
F15	3.0	7.2	1.44	0.85	100
F16	3.0	7.2	3.05	1.55	115
F17	3.0	7.5	5.61	1.21	90, 125, 160
F19	3.0	7.0	2.79	1.12	120, 160
F20	3.0	7.5	0.61	0.75	610

**Tabla 2-4. Resultados del Análisis de Peligro Sísmico: Máximas aceleraciones esperadas en la Ciudad de Moquegua (cm/s<sup>2</sup>)**

Coordenadas		Punto	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)						
Long.	Lat.		30	50	100	200	400	475	950
-71.10	-17.40	1	144.4	180.8	245.3	315.3	403.5	426.3	532.5
-70.85	-17.40	2	141.8	176.8	238.8	306.9	391.0	413.4	514.0
-70.60	-17.40	3	139.1	172.9	232.4	298.7	378.5	400.9	497.8
-71.10	-17.15	4	141.0	175.5	236.4	303.7	386.0	408.2	506.0
-70.85	-17.15	5	138.4	171.7	230.3	295.8	373.9	395.9	490.0
-70.60	-17.15	6	135.9	168.1	224.6	289.0	363.8	384.9	475.4
-71.10	-16.90	7	137.5	170.5	228.2	293.2	369.8	391.4	483.8
-70.85	-16.90	8	135.3	167.2	223.0	286.8	360.3	381.0	470.2
-70.60	-16.90	9	132.9	163.9	217.8	280.5	351.0	370.9	457.5



**Figura 2-1:** Mapa de Localización del epicentro y Distribución de Réplicas

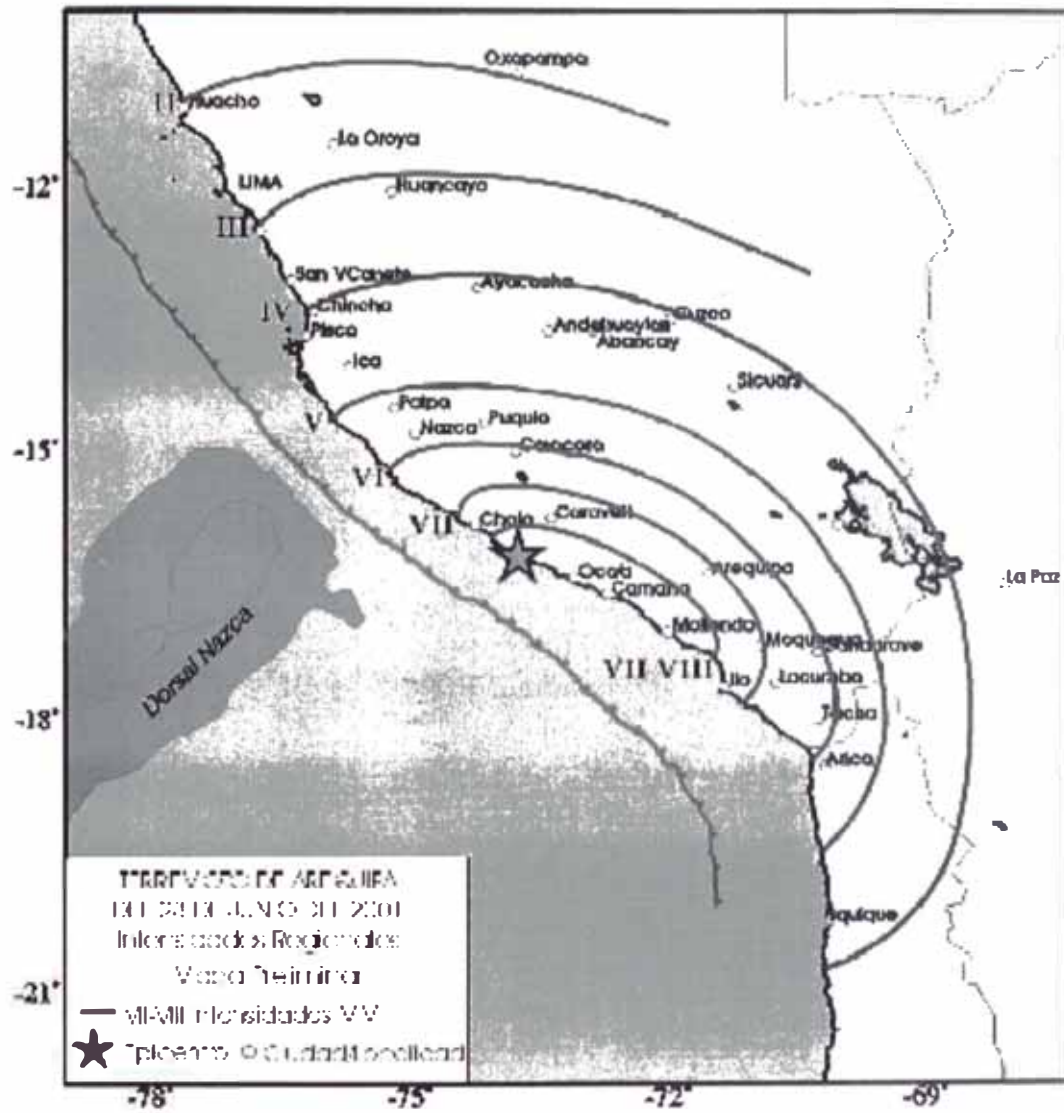


Figura 2-2: Mapa de Isosistas



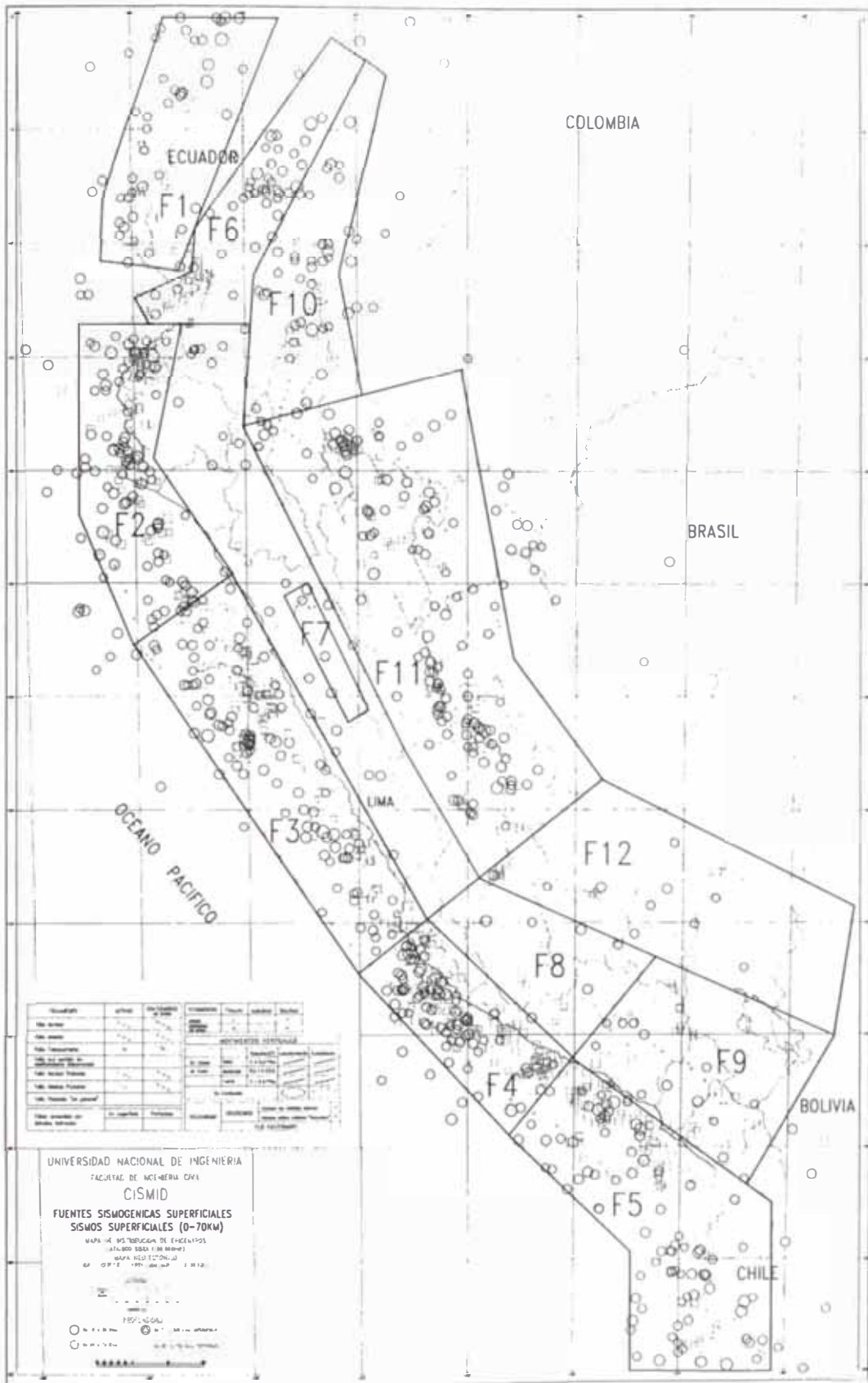


Figura 2-4: Mapa de Fuentes Sismogénicas Superficiales

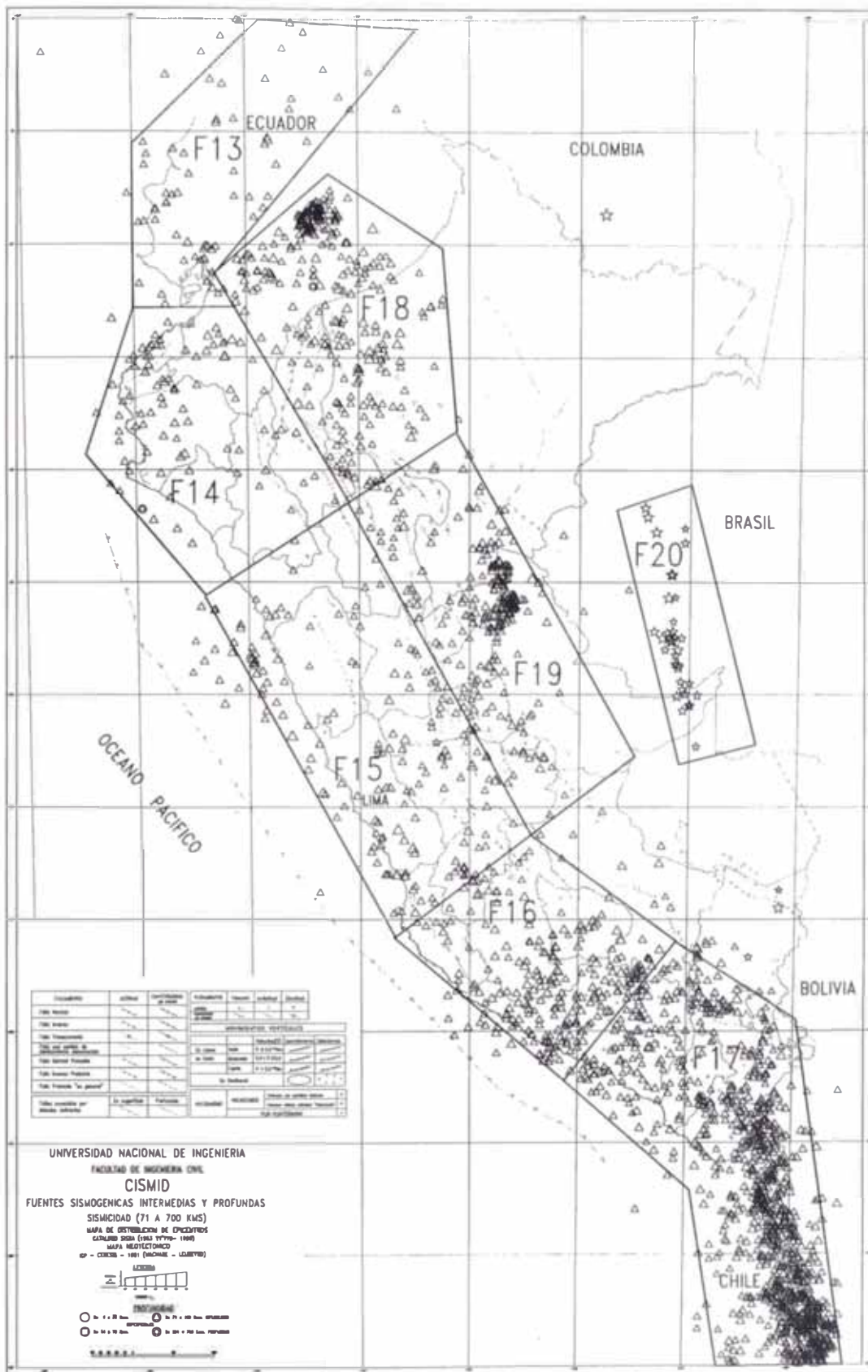


Figura 2-5: Fuentes Sismogénicas Intermedias y Profundas

## CAPÍTULO 3

### CONDICIONES GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS

#### 3.1 Características Geológicas de la Región Sur Occidental del Perú

##### 3.1.1 Estratigrafía

Del mapa geológico de la zona de Moquegua se observan las siguientes unidades litológicas:

##### \* Grupo Toquepala

Está conformado por rocas volcánicas con intercalaciones de clásticos gruesos, las cuales afloran a lo largo del Flanco Andino, desde los cerros La Caldera en Arequipa hasta la frontera con Chile. No se han encontrado fósiles que nos puedan indicar la edad de este grupo en los escasos horizontes de rocas sedimentarias.

Regionalmente los volcánicos del grupo Toquepala sobreyacen con discordancia angular, al grupo Yura del Jurásico – Superior Cretáceo-Inferior, e infrayacen con igual relación a la formación Moquegua considerada del Mio-Plioceno. En conformidad a estas relaciones amplias y generales la edad del grupo Toquepala está aproximadamente comprendida entre el Cretáceo Medio y el tope del Terciario Inferior.

En el cuadrángulo de Moquegua, el grupo Toquepala se ha dividido en las siguientes formaciones:

Volcánico Quellaveco

Volcánico Paralaque

Formación Inogoya

Formación Toquepala

##### **Formación Toquepala**

**Potencia:** 700 m.

**Localización:** Al nor-este de la ciudad de Moquegua en el cuadrángulo del clemesí aflora la sección más baja del grupo Toquepala llegando la prolongación de estos afloramientos hasta los cañones de los cursos inferiores de los ríos Huaracane y Torata.

**Litología:** Está compuesta de derrames, brechas de flujos piroclásticos de composición andesítica dacítica y riolítica de color gris verdoso, pardo y violeta.



### **Formación Inogoya**

**Potencia:** 430 m.

**Localización:** En el paraje de Inogoya situado en la Quebrada de Otorá, a unos 6 km. al Oeste de Torata, aflora una secuencia de conglomerados y areniscas gruesas a la que se le denominó formación Inogoya, la cual también se nota en la pequeña quebrada La Cantera, al Oeste de Torata.

**Litología:** Está compuesta de conglomerados muy gruesos de naturaleza volcánica y matriz areno-tufácea, la roca es de color marrón claro a gris verdoso. La parte superior es areno tufácea de color pardo a verdoso.

### **Volcánico Paralaque**

**Potencia:** 2000 m.

**Localización:** El nombre de esta formación deriva de la hacienda Paralaque, ubicada en las laderas del río Quele a unos 5 km al NO de Torata, donde aflora una secuencia de rocas volcánicas de más de 2000 m. de espesor. La carretera que va a Puno por la ladera izquierda de Chujulay y la que conduce a la mina de Cuajone cortan secciones completas de esta formación. Esta formación aparece también en la parte baja de la mina Toquepala, a lo largo de los cerros Incapuquio, Totoral, Higuera, etc.

**Litología:** Se compone de gruesos derrames de andesita, dacita y riolita de colores marrón, rosado, blanco grisáceo, verdoso, etc., con algunas intercalaciones de piroclásticos y lentes de conglomerados.

### **Volcánico Quellaveco**

Esta denominación se da a un conjunto de rocas volcánicas de la parte superior del grupo Toquepala que afloran a lo largo de una faja de rumbo NO-SE de cerca de 12 km. de ancho, encontrándose el depósito cuprífero de Quellaveco en su parte central.

Los miembros del Volcánico Quellaveco en secuencia son:

Riolita Tinajones

Riolita Yarito

Serie Alta

Serie Toquepala

Pórfido Quellaveco

### **Pórfido Quellaveco**

**Potencia:** 300 m.

**Localización:** Aflora en forma muy restringida en los alrededores de las minas Cuajone, Quellaveco y Toquepala.

**Litología:** Consiste de derrames macivos de riolita de color blanco amarillento a gris blanquecino.

### **Serie Toquepala**

**Potencia:** 420 m.

**Localización:** Esta formación es completamente local, solo aflora en una pequeña colina que se yergue al lado NO del tajo abierto de la mina Toquepala.

**Litología:** Incluye derrames de pórfido cuarífero, andesitas, riolitas y doleritas.

### **Serie Alta**

**Potencia:** 950 m.

**Localización:** Este es el miembro más extenso del volcánico Quellaveco, aflora en las minas Cuajone, Quellaveco y Toquepala.

**Litología:** Consiste de derrames y piroclásticos gruesos riolíticos, dacíticos y andesíticos intercalados con clásticos gruesos.

### **Riolita Yarito**

**Potencia:** 100 m.

**Localización:** Al Oeste de la mina de Toquepala se levantan los cerros Yarito y Cruz Laca donde aflora localmente esta unidad.

**Litología:** Está formada por una roca riolítica de color gris rosado, crema o blanquesina.

### **Riolita Tinajones**

**Potencia:** 150 m.

**Localización:** Aflora en el cerro Tinajones ubicado a escasos kilómetros al este del yacimiento cuprífero de Cuafone.

**Litología:** Está constituido por derrames riolíticos de color gris con matices rosados a crema y verde claro a blanco amarillento.

### **\* Formación Moquegua**

La formación Moquegua sobreyace con discordancia erosional a los volcánicos del Grupo Toquepala asignados al intervalo Cretáceo Superior y Terciario Inferior; por partes infrayace con igual relación a los tufos Huaylillas, considerados como del Terciario Superior (Plioceno). En esta formación no se ha encontrado hasta el presente evidencias

paleontológicas para determinar su edad, por eso su ubicación geocronológica está basada sólo en su posición estratigráfica.

Según la relación indicada, la formación Moquegua estaría ubicada en el Terciario Superior, y con relaciones de carácter regional probablemente corresponde a los niveles del Mio-Plioceno. Está conformada por los miembros Moquegua Superior y Moquegua Inferior.

### **Moquegua Inferior**

**Potencia:** 150 m.

**Localización:** Este miembro se aprecia bien en las partes bajas del valle de Moquegua, así como también al Sur de la ciudad. Además, Un afloramiento pequeño del Moquegua Inferior se encuentra a 4 km al Este del Pueblo de Torata.

**Litología:** Consiste en una secuencia de areniscas arcósicas o tufáceas, de color gris a marrón claro, que alternan en forma casi regular con areniscas arcillosas y arcillas grises a rojizas.

### **Moquegua Superior**

**Potencia:** 420 m.

**Localización:** Las capas del Moquegua Superior se exponen en las laderas altas del Valle de Moquegua y aparecen en buenas extensiones de las pampas del pie del Frente Andino. Exposiciones más reducidas se reconocen al Nor-Este y Este de la ciudad de Moquegua, es decir en la esquina superior derecha del cuadrángulo.

**Litología:** Está constituido principalmente por arena conglomerádica y secundariamente se intercalan tufos, areniscas arcillas, tufos redepositados, etc.

### **\* Formación Huaylillas**

**Potencia:** 150 m.

**Localización:** Se presenta mayormente en el sector norte del cuadrángulo de Moquegua, donde sus afloramientos se hallan distribuidos a manera de parches irregulares o lenguas que cubren las superficies entre quebradas adyacentes.

**Litología:** Consiste de tufos dacíticos y riolíticos de colores blanco grisáceo, gris blanquesino y rosado.

**Edad:** No se dispone de ninguna evidencia para determinar la edad de estas rocas volcánicas que sobreyacen con discordancia a la Formación Moquegua, considerada del Mioceno – Plioceno, e infrayacen a la formación Capillune, supuesta del Plioceno Superior. En consecuencia a falta de mayores pruebas se asigna a esta formación una edad del Plioceno Medio Superior.

### \* Formación Capillune

**Potencia:** 220 m.

**Localización:** Aflora típicamente en la localidad de Capillune, del cuadrángulo de Maure, pero en la hoja de Moquegua aflora en el extremo nor-este, en los alrededores del poblado de Asana.

**Litología:** Esta formada por una secuencia de conglomerados, areniscas, arcillas y tufos redepositados de origen lacustre.

**Edad:** En los sedimentos de la formación Capillune no se han encontrado fósiles. A falta de evidencias paleontológicas su edad es sólo aproximada y queda determinada por su posición estratigráfica. Suprayace al volcánico Huaylillas, considerado del Plioceno Medio a Superior e infrayace al volcánico barroso, de supuesta edad pleistocénica; por las razones citadas se refiere esta formación al Plioceno Superior.

### \* Formación Barroso

**Potencia:** 800 m.

**Localización:** Esta formación está conformando la Cordillera del Barroso, que pasa por la esquina nor-este de la hoja de Moquegua, representada por los volcanes Arundane (5247 m) y Chuquimanta (5428 m).

**Litología:** Su composición es predominante andesítica, traquítica y traquiandesítica. Las rocas de la formación consisten en derrames intercalados con brechas de flujo piroclásticos de color gris claro, gris pardo, hasta gris oscuro.

**Edad:** No hay referencia definida, así que en base a consideraciones generales de estratigrafía y relaciones regionales, se ubica el volcánico barroso en el Terciario Superior y Cuaternario.

### \* Depósitos Morrenicos y Fluvioglaciales

**Potencia:** 30 m.

**Localización:** Se encuentran cubriendo los flancos bajos de los volcanes Arundane y Chuquimanta.

**Litología:** El material morrénico se compone de una mezcla heterogénea de cantos angulosos de rocas volcánicas en una matriz areno-arcillosa.

**Edad:** Pertenecen al Cuaternario

### \* Depósitos Aluviales

**Potencia:** 50 m.

**Localización:** Se desarrollan inmediatamente delante del frente andino entre los valles de Moquegua y Locumba.

**Litología:** Están compuestos por cantos redondeados, subangulosos y angulosos de toda clase de rocas, pero mayormente volcánicos de colores morado, pardo, negro, etc., de 5 a 30 cm. de diámetro englobados en una matriz areno-arcillosa.

**Edad:** Cuaternario (reciente)

### 3.1.2 Rocas Intrusivas

En el área del cuadrángulo de Moquegua, las rocas intrusivas afloran en la parte media septentrional, principalmente a lo largo del Flanco Andino, con un desarrollo NO-SE, es decir aproximadamente diagonal a la hoja.

El tamaño de los intrusivos observados y mapeados varía desde apófisis hasta stocks de dimensiones más o menos considerables. En el paisaje los cuerpos más grandes destacan por su topografía prominente y en algunos casos por su coloración. Se han cartografiado los siguientes grupos de rocas intrusivas:

- a) Diorita - granodiorita
- b) Granito
- c) Monzonita cuarcífera y dacitas
- d) Chimeneas de brecha
- e) Cuello volcánico
- f) Dique de Aplita

El orden corresponde al emplazamiento relativo de los cuerpos intrusivos. No se dispone de dataciones radiométricas de las monzonitas y dacitas que se encuentran en el área de los depósitos de Toquepala, Quellaveco y Cuajone, las cuales se supone genéticamente asociadas por su mineralización. Por sus relaciones de campo, se sabe que la dacita en Toquepala así como las monzonitas de Quellaveco y Cuajone intruyen a dioritas consideradas parte del batolito andino.

La diorita que aflora en las inmediaciones de la mina de Toquepala tiene una edad radiométrica determinada por el método K/Ar de 53 M.A., por lo tanto corresponde al Terciario Inferior; como consecuencia de esta información se asume que el pórfido dacítico sea del Terciario Inferior a Medio.

### 3.1.3 Geología Estructural

Las fallas constituyen las estructuras más importantes del cuadrángulo de Moquegua. En cambio los pliegues son muy escasos y relativamente pequeños, y no vienen a ser más que leves ondulaciones que afectan a la formación Moquegua del Terciario Superior.

#### Fallas

Estas pueden agruparse de la siguiente forma:

##### a) Sistema de Fallas Incapuquio

El sistema de fallas en mención es clasificado como de tipo transcurrente. Tiene desarrollo regional con una traza casi recta con dirección N45°E. Esta falla pasa inmediatamente al Norte de la ciudad de Moquegua, delante de los cerros Los Angeles, Estuquiña y Huaracane.

##### b) Falla Micalaco

Esta estructura queda a 6 ó 7 km, al Norte de la Falla Incapuquio, siendo más o menos paralela a ésta, por lo que puede pertenecer al mismo sistema.

##### c) Fallas del área de Otorá

Entre los parajes de Otorá y Polobaya se han mapeado dos fallas paralelas de rumbo N-S que afectan las rocas del volcánico Paralaque.

##### d) Fallas Menores

En varias localidades de la zona se han mapeado otras fallas de corto recorrido. Entre las más saltantes están:

- La falla de rumbo N-S que pasa a unos 2.5 km. al Oeste de Cuajone en forma transversal al valle del río Torata.
- En el mismo valle del río Torata, a pocos kilómetros al Oeste del paraje de Ichupampa se ha mapeado otra falla de rumbo EO y buzamiento próximo a la vertical.

#### Pliegues

No se han observado pliegues producidos por esfuerzos de compresión. Las suaves ondulaciones y flexuras que muestran las capas de la formación Moquegua, del Terciario Superior, probablemente se deben a reajustes de dichos sedimentos

durante los movimientos post-orogénicos como son: los reajustes del sistema de fallas Incapuquio, el levantamiento andino, etc.

## **3.2 Topografía del Área en Estudio**

La topografía de la zona donde se encuentra el área en estudio es variada debido a que la ciudad de Moquegua se sitúa al borde de la Llanura Costanera, casi en el límite del Flanco Andino. Esta zona se caracteriza por sus terrenos llanos y áridos, fuertemente disectados por quebradas.

La zona urbana de Moquegua se encuentra a 1410 m.s.n.m., en un área de pendiente relativamente alta con dirección NS. La zona central y antigua de la ciudad se encuentra circundada al norte por su valle; y por cerros en sus otros extremos, los que al poblarse han dado lugar a la formación de pueblos jóvenes donde se asientan el 48% del total de viviendas del área urbana de la ciudad de Moquegua. En la parte norte de la ciudad está ubicado el valle con pendiente hacia el Noreste. El río Moquegua, que es el que irriga el valle, se forma por la confluencia de los ríos Tumilaca y Torata. El caudal de este río es sumamente variable, durante la época de lluvias (Diciembre – Marzo), la parte alta de la zona puede descargar gran cantidad de agua; mientras que durante el estiaje está frecuentemente seco. El Plano P-01 muestra la conformación topográfica de la zona en estudio, en el cual se indica también las áreas urbanas consideradas en el presente estudio.

## **3.3 Geología Local del Área de Moquegua - Samegua**

### **3.3.1 Geomorfología**

El área de estudio está emplazada sobre el lecho y los flancos del valle que transcurre en dirección Noreste a Suroeste, dentro del cual se ubica la ciudad de Moquegua y las zonas agrícolas. La otra parte del territorio es árida, y está compuesta por colinas y penillanura costera, en la cual se ubican los poblados de San Antonio, Chen Chen, Samegua y Los Angeles. Todas las unidades geomorfológicas están constituidas por depósitos clásticos del terciario superior pertenecientes a la Formación Moquegua y a depósitos del cuaternario, los cuales están disectados por numerosas quebradas que confluyen en el valle de los ríos Tumilaca, Torata, Huanrancane. De Noreste a Suroeste se ubican las colinas costeras, cuyas altitudes aproximadas varían de 1,550 a 1,800 m.s.n.m., estando conformadas por afloramientos sedimentarios de la formación Moquegua Superior (depósito grueso), como puede observarse en el Plano P-02 de Unidades Geomorfológicas. Al Noreste de la zona de

estudio, que no aparece en este plano, se ubican las colinas volcánicas, con una altitud promedio de 2,500 m.s.n.m., estando conformadas por rocas volcánica de la formación Toquepala.

### **3.3.2. Geodinámica**

La actual geoforma de la zona de estudio está determinada por los eventos tectónicos sucedidos desde el terciario hasta el cuaternario y se encuentra en evolución de acuerdo al tiempo geológico, donde la formación Moquegua está siendo fuertemente erosionada y disectada por quebradas secas, con tributarios que surcan las diversas "pampas", como las de Chen Chen, San Antonio, entre otras. Se han podido localizar evidencias de movimientos de masas en el cerro El Siglo, donde se observa escarpes casi verticales con alturas de 10 a 20 m y topografía de bastante pendiente.

Fenómenos recientes que pueden generar inestabilidad o áreas de peligro geodinámico son los deslizamientos, desprendimientos y caídas de roca del talud de la vía que comunica el cercado de Moquegua con San Antonio, tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho. En este lugar se deslizan bloques de roca sedimentaria constituidas por areniscas lutáceas de la formación Moquegua Inferior, que aflora en la mayor parte de la localidad de San Antonio y alrededores. En esta misma zona, donde transcurre la Carretera binacional, los taludes están fuertemente agrietados en algunos sectores, por lo que se podrían delimitar como zonas de probable deslizamiento o desprendimiento de rocas. En la quebrada "El Pedregal" o valle seco, ubicado al Noreste de la ciudad de Moquegua, existe un área longitudinal de deslizamiento pequeño de material granular, en el talud derecho aguas abajo. Así mismo, en la mayoría de las quebradas y valles secos existen evidencias de la presencia de los fenómenos dinámicos como huaycos, que son materiales arrastrados por aguas en épocas de avenidas o escorrentia pluvial. Estas evidencias se observan notoriamente en las zonas aledañas a las pampas de Chen Chen, San Antonio y otros lugares, como se muestra en el Plano P-03, de Geología Superficial y Geomorfología Local.

### **3.3.3 Estratigrafía Local**

La unidad geológica observable por su mayor área de extensión es la denominada Formación Moquegua Superior. Esta formación está superficialmente transformada en una cobertura de suelo residual de un espesor de 5 a 15m aproximadamente, la cual está compuesta por gravas y arenas de compacidad suelta a media. Seguidamente, a mayor



profundidad esta formación está constituida por roca sedimentaria sana, compuesta por areniscas y conglomerados bastante resistentes, de color gris oscuro. Un lugar donde se puede observar estas rocas es el talud de corte de la prolongación de la Avenida Tacna que comunicará la ciudad de Moquegua con el futuro poblado de Chen Chen y que actualmente se encuentra en construcción.

La otra unidad observable es la denominada Formación Moquegua Inferior, la cual está conformada por lutitas y areniscas arcósicas de color marrón y marrón claro. Se pueden identificar afloramientos de estos materiales en los cortes de la Carretera Binacional y otras vías de la zona de San Antonio, los cuales tienen estratificación casi horizontal y son concordantes con la Formación Moquegua Superior, a la cual infrayase. En algunos lugares se observa pequeños lentes o vetillas de sales y sulfatos de manera discontinua. Las Figuras 3-1 (Sección Geológica A-A') y 3-2 (Sección Geológica C-C') muestran los perfiles geológicos de estas formaciones.

Los afloramientos volcánicos pertenecientes a la Formación Toquepala están en menor área de extensión, observándose al Norte de la localidad de Samegua, así como en la zona alta de los poblados de Los Angeles y Estuquiña. Litológicamente están constituidos por rocas andesitas, dacitas, riolitas, bastante resistentes y fracturadas en forma de bloques.

Como última unidad se describe los depósitos cuaternarios recientes, los cuales se dividen en depósitos residuales y transportados. Los primeros son producto de la intemperización física y química de los conglomerados de la Formación Moquegua Superior, siendo visibles como cobertura de grava, arena y limo de granulometría heterogénea, con partículas de forma redondeada a subredondeada y compacidad suelta a media. Está distribuido y espaciado en considerables áreas de extensión en toda la geoforma de valles, quebradas, terrazas, colinas, etc. Sobre este depósito se asientan los pueblos de Samegua, Los Angeles, Estuquiña, Cerro el Siglo, Chen Chen, Mariscal Nieto y otros, En la zona de Chen Chen se encuentra combinado con material aluvial, de ahí la presencia de un 10% de bolones y bloques de 0.80 a 1.5m de diámetro. En la zona de San Antonio el suelo residual está compuesto por arena, limo, arcilla, producto de la intemperización de los afloramientos de roca sedimentaria (lutitas y areniscas lutáceas) de la Formación Moquegua Inferior siendo su potencia de 0.30 a 1.0 m y su consistencia media a dura. Estos materiales se muestran en los perfiles geológicos de las Figuras 3-3 (Sección Geológica B-B') y 3-4 (Sección Geológica D-D')..

Los depósitos transportados están conformados por suelos coluviales, aluviales y fluviales; pero éstos en la zona de estudio se encuentran combinados entre sí por diferentes eventos de deposición, tal como el coluvial-aluvial, que es el producto del transporte por gravedad y humedad del suelo granular correspondiente a la Formación Moquegua Superior e Inferior hasta el pie de las laderas naturales, formando una mezcla de grava y arena, con matriz limosa y arcillosa, de estratificación discontinua y heterogénea y potencia variable. Estos materiales son identificables en la zona media y baja de la ciudad de Moquegua, San Antonio y los Angeles.

Los suelos aluviales se pueden observar en la parte media y baja de Moquegua, Samegua, Los Angeles y Estuquiña. La potencia de estos depósitos varía de 1 a 5 m y el tamaño de las partículas que conforman estos suelos varía de gruesa a fina, siendo de forma redondeada, sub angular y angular, y estando estratificada de manera discontinua y casi horizontal. En algunos lugares este material se encuentra combinado con suelos coluviales, como se observa en el Plano P-03 de Geología Superficial y Geomorfología Local.

Los suelos fluviales se pueden observar en toda la longitud base o lecho del valle húmedo, en el lecho mayor de inundación de los ríos, en las quebradas y en los valles secos. Estos suelos, que en mayor extensión se pueden ubicar en los lechos de los ríos Tumulaca, Huancarane y Moquegua; están conformados por gravas y arenas, de formas redondeadas a subredondeadas, con matriz limosa, de compacidad suelta. En algunos lugares se encuentran mezclados principalmente con suelo aluvial, como se puede observar en la parte media y alta de San Antonio.

La litología predominante de las partículas que conforman los depósitos de suelos anteriormente descritos, en mayor porcentaje es de tipo volcánica, estando conformada por andesitas en un 25 a 30%, dacitas en similar porcentaje, riolitas de 15 a 20%, tufos de 10 a 15% y otros de 5 a 10%.

#### **3.3.4 Aspectos Estructurales**

Estructuralmente las formaciones Moquegua Superior e Inferior proceden de diferentes eventos geológicos y tectónicos. La primera se supone que es el resultado del relleno mediante fuertes corrientes de transporte y deposición de una cuenca longitudinal existente entre la Cadena Costanera y el Pie de los Andes, originando la formación de rocas conglomerádicas. La segunda es producto de la sedimentación de

manera lenta de material predominantemente fino en cuencas lacustres, lo cual generó la formación de rocas lutáceas y arenosas. La estratificación de ambos tiene un suave buzamiento de 2° a 10° SO – SE y un plegamiento muy suave. Existe evidente diaclasamiento, así como fracturamiento vertical y horizontal en ambas formaciones; además existen fallamientos de aspecto local y tipo normal, observable en los taludes del canal de Pasto Grande ubicado al sur este de Chen Chen.

### **3.3.5 Hidrogeología**

Al efectuar la evaluación de la presencia de aguas subterráneas en el área de estudio, se encontró filtraciones de agua en la zona de Chen chen, al lado de la planta de tratamiento de agua. El área donde se presentan estas filtraciones se utiliza como zona de cultivo. Así mismo, se ubicaron otras fuentes de agua subterránea en la localidad de San Antonio, en el Centro de Salud de San Antonio, donde se presenta una filtración de agua a una profundidad de 2.5 a 3.0m, con dirección de flujo subterráneo de Noreste a Suroeste. Este flujo podría ser originado por la infiltración y percolación de aguas pluviales desde las partes altas y estaría ocasionando problemas de expansión en rocas y suelos arcillosos de la Formación Moquegua Inferior que esta ubicado debajo de suelos granulares. También existen manantiales de pequeño caudal en algunos otros lugares de esta zona. En la parte media a baja del cercado de Moquegua se ubicó aguas freáticas con dirección de flujo subterráneo hacia la zona baja del valle o lecho del río.'

## CAPÍTULO 4

### CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA

#### 4.1 Introducción

Para determinar las características geotécnicas de la ciudad de Moquegua. Esta presente disertación se basa en la información obtenida en las dos campañas de exploración de campo, que incluyeron la excavación de 77 calicatas de 4 m de profundidad, la realización de 7 ensayos de carga directa in situ, ensayos de refracción sísmica y medición de microtrepidaciones que cubrieron uniformemente todo el área urbana. Esta información fue complementada con la recopilación de estudios de mecánica de suelos con fines de cimentación e investigaciones realizadas en el área de estudio.

La evaluación de los resultados de los ensayos elaborados y de toda la información recopilada ha permitido determinar perfiles estratigráficos característicos de las diferentes áreas estudiadas y definir zonas con características geotécnicas similares. Esta zonificación geotécnica, que incluye el comportamiento dinámico del terreno para cada una de las zonas definidas, constituye el principal aporte del presente informe. Así mismo, con los resultados obtenidos y la cuantificación de la amenaza sísmica, se ha evaluado el grado de vulnerabilidad de las viviendas en las condiciones actuales, el cual será integrado en un sistema de información geográfica para su rápido y adecuado manejo por las entidades encargadas del desarrollo urbano de la ciudad de Moquegua.

El presente tesis documenta las actividades realizadas durante las dos campañas de exploración geotécnica, así como el análisis y la evaluación de los resultados obtenidos que han permitido realizar la zonificación geotécnica, las cuales incluyen recomendaciones para la construcción de viviendas de interés social.

#### 4.2 Exploración de Campo

Los trabajos de exploración de campo consistieron en la realización de calicatas de hasta 4 m de profundidad para la auscultación del subsuelo de cimentación.

En la zona de expansión urbana de Chen Chen y en el CPM San Antonio también se realizaron ensayos de carga directa con saturación del suelo, lo cual permitió evaluar la colapsabilidad del suelo de cimentación. Así mismo, con la finalidad de

determinar la potencia del material superficial existente en la zona de Chen Chen, se ejecutaron 3 línea de refracción sísmica, y para determinar las características dinámicas del terreno de fundación en todo el área urbana, se realizaron 150 ensayos de medición de microtrepidaciones. La ubicación de las calicatas y los ensayos realizados se muestran en el Plano P – 04.

#### **4.2.1 Excavación de Calicatas**

Las excavaciones de las Calicatas se realizaron con herramientas como lampa, pico y barreta, hasta una profundidad máxima de 4.0 m. Los materiales encontrados son bloques, bolones, grava, arena, de compacidad medio suelta, limo y arcilla, de consistencia muy compacta, de color beige a marrón. No se observó en ninguna calicata el nivel freático. El afloramiento de la arcilla denominada "Moro Moro" es muy errático y se presenta principalmente en el CPM San Antonio, CPM San Francisco, Chen Chen y El Cercado Moquegua.

En cada una de las calicatas excavadas se procedió a la toma de muestras de los diferentes tipos de suelos presentes siguiendo la norma de recolección y muestreo (ASTM 420), así mismo se realizó la clasificación visual del material encontrado en el campo de acuerdo a los procedimientos indicados en la Normas ASTM 2488.

Los registros de sondajes de cada una de estas calicatas realizadas se presentan en el Anexo I. Así mismo, en el Anexo VI se presenta un registro fotográfico de las exploraciones realizadas en cada una de las zonas investigadas.

#### **4.2.2 Ensayo de Colapso in situ**

El ensayo de colapso in situ es una variación del ensayo de carga directa o ensayo de placa. Éste consiste en aplicar una carga de  $2 \text{ kg/cm}^2$  al suelo en estado seco (con su contenido de humedad natural) y luego que se haya estabilizado el asentamiento generado por la acción de esta carga, se inunda el suelo con agua y se miden los asentamientos que se producen por efecto de la saturación del suelo. Una vez que no se registren mas asentamientos importantes, se continúa incrementando la carga hasta provocar la falla del suelo o hasta que la carga aplicada iguale a la carga de reacción.

La serie de carga aplicada es de 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 kg/cm<sup>2</sup> y luego se descarga aplicando en sentido inverso el mismo tren de carga. La diferencia de lectura en estado seco y saturado bajo la acción de la carga de 2 kg/ cm<sup>2</sup> será un indicador del potencial de colapso del suelo.

En la zona de Chen – Chen se realizaron 5 ensayos de colapso denominados EPC-1 al EPC-5 y en el Centro de Salud de San Antonio se realizaron otros dos ensayos. Los resultados de estos ensayos, que se presentan en el Anexo II, muestran que los asentamientos del terreno bajo la acción del agua son relativamente pequeños, dando valores de alrededor de 1 mm, lo cual indica que el potencial de colapso de estos suelos es bajo. Así mismo, los asentamientos máximos registrados bajo la acción de las cargas máximas aplicadas de 8 a 10 kg/cm<sup>2</sup>, varían entre 8 y 14 mm, indicando una adecuada resistencia del terreno en las zonas evaluadas. Las ubicaciones de estos ensayos se indican en el Plano P – 04, y un registro fotográfico de la ejecución de los mismos se presenta en el Anexo VI.

#### **4.2.3 Ensayos de Refracción Sísmica**

El Ensayo de Refracción Sísmica consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas compresionales (ondas P), y algunas veces de las ondas de corte (ondas S), generada por una fuente de energía impulsiva a unos puntos localizados a diferentes distancias a lo largo de un eje sobre la superficie del suelo. La fuente de energía es generalmente una carga pequeña de explosivo o un golpe de martillo. La energía es detectada, amplificada, y registrada de tal manera que puede determinarse su tiempo de arribo en cada punto. El instante del impacto o explosión, "Tiempo cero", también es registrado conjuntamente con las vibraciones del suelo que arriban de los geófonos. Por lo tanto, en general, los datos consisten en tiempos de viaje y distancias, siendo el tiempo de viaje el intervalo entre el "Tiempo cero" y el instante en que el geófono empieza a responder a la perturbación.

Entonces, esta información tiempo - distancia es procesada para obtener una interpretación de la forma de velocidades de propagación de ondas y la estructura de los estratos del subsuelo. Todas las mediciones son efectuadas en la superficie del terreno, y la estructura del subsuelo es inferida de los métodos de interpretación basados en las leyes de propagación de ondas.

Este ensayo permite describir la estructura del subsuelo por medio de secciones con la distribución de velocidades de ondas P y de potencias (espesores) y profundidades de horizontes elásticos (perfiles sísmicos); así mismo, detecta la posición de las zonas de debilidad (fallas o fracturas), oquedades, discontinuidad, etc. Colocando los geófonos en posición horizontal y realizando los impactos de tal forma de generar predominantemente ondas de corte en la superficie del terreno, se pueden también determinar las velocidades de propagación de las ondas S; por lo tanto en algunas circunstancias este ensayo es utilizado también para determinar las propiedades dinámicas del subsuelo.

### **Equipo e Instrumentos**

El Laboratorio Geotécnico del CISMID posee un moderno sistema de adquisición de datos de prospección sísmica, GEODAS 10, el cual tiene las siguientes características:

16 canales de entrada, cada uno tiene un convertidor A/D individual con resolución 24bit y alta velocidad de muestreo

sensores de 14 Hz de frecuencia los cuales permiten registrar las vibraciones ambientales del terreno producidas por fuentes naturales o artificiales y arribo de las ondas P y ondas S.

Computadora portátil, PC Toshiba SS-3480, Pentium III de 600MHz., RAM 64MB. Disco Duro de 12GB

Cable conector de 100 m de longitud, con espaciamentos máximos de 5m entre geófonos y conectores en ambos extremos.

El sistema mejora los registros de campo en una forma fácilmente legible reduciendo la relación señal-a-ruido con el proceso de superposición o almacenamiento de registro múltiples. Las ondas sísmicas obtenidas son mostradas en una pantalla de cristal líquido (LCD) y son almacenadas en formato binario en el disco duro de la computadora, las que pueden ser exportadas a formato ASCII.

### **Trabajo de Campo**

Se realizaron 3 líneas de ensayos de refracción sísmica, con un total de 640 m de longitud, en la zona de Chen Chen. La ubicación de cada una de estas líneas se indica en el Plano P-05. Estos ensayos fueron realizados con la finalidad de explorar la potencia del estrato de suelo superficial de esta zona, pues durante la exploración directa mediante calicatas, se determinó que

hasta la profundidad máxima de 4 m, el perfil estratigráfico presenta un suelo gravoso homogéneo.

Los ensayos se realizaron utilizando 16 geófonos espaciados cada 5 m y con longitudes de tendida de línea de 80 m. Como fuente de energía se utilizó el impacto de un martillo de 10 lb de peso, generando como mínimo 4 impactos para obtener un registro promedio de la señal sísmica. Los registros sísmicos obtenidos en cada una de las líneas investigadas se presentan en el Anexo II, conjuntamente con las curvas tiempo distancia (dromocrónicas).

### **Procesamiento e Interpretación de la Información**

Los registros sísmicos obtenidos en cada línea fueron procesados utilizando un programa de cómputo integrado al sistema GEODAS 10 y la interpretación de los resultados fue realizada con un software de procesamiento de señales sísmicas. Los perfiles sísmicos obtenidos para las tres líneas se presentan en el Anexo IV, cuyos resultados se describen a continuación:

- a) El Eje 01 tiene una longitud de 240 m y se encuentra ubicado a 150 m sobre el canal de Pasto grande. En este perfil se observa un primer estrato con velocidades promedio de onda P alrededor de 270 m/s, cuyo espesor varía entre 1.5 y 3 m. El material que conforma este estrato está constituido por una grava de compacidad suelta, con matriz areno limosa o limo arenosa. Debajo de este estrato se encuentra una grava de compacidad media, con velocidades de onda P entre 440 y 580 m/s, cuyo espesor varía entre 6 y 7 m. Subyaciendo a este estrato se presenta una grava de compacidad media a densa, con velocidades promedio de onda P de 965 m/s.
- b) El Eje 02 tiene una longitud de 240 m y se encuentra ubicado a 50 m debajo del canal de Pasto grande. El perfil sísmico presenta un primer estrato con velocidades promedio de onda P alrededor de 260 m/s, con un espesor que varía entre 1.5 y 3.4 m. El material que conforma este estrato está constituido por una grava de compacidad suelta con matriz areno limosa o limo arenosa. Debajo de este estrato se encuentra una grava de compacidad media, con velocidades de onda P entre 710 y 840 m/s, cuyo espesor varía entre 10 y 16 m. Subyaciendo a este estrato se presenta una grava de compacidad media a densa con velocidades promedio de onda P de 1030 m/s.



c) El Eje 03, de 160 m de longitud, está ubicado a 150 m al sur del Eje 02, a corta distancia de la carretera binacional y en forma paralela a ésta. El perfil sísmico presenta un estrato con velocidades promedio de onda P entre 275 y 305 m/s y espesores entre 1.70 y 2.50 m. Este estrato está conformado por una grava de compacidad suelta, con bolonería aislada y matriz areno limosa o limo arenosa. Seguidamente se encuentra un estrato de grava con presencia de tufos volcánicos en forma errática, de compacidad media, con velocidades de onda P que varían entre 610 y 780 m/s y cuyo espesor está entre los 6.0 y 11.0 m. Subyaciendo a este estrato se presenta una grava de compacidad media a densa, con velocidades promedio de onda P de 1030 m/s.

### 4.3 Ensayos de Laboratorio

Con las muestras obtenidas en los trabajos de exploración directa, se realizaron ensayos estándar y especiales de mecánica de suelos para determinar la características físicas y mecánicas de los diferentes suelos encontrados. Los ensayos estándar de las muestras de suelos obtenidas en la primera campaña de exploración, fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto Nacional de Desarrollo – Moquegua. Los ensayos especiales y los ensayos estándar de las muestras obtenidas en la segunda campaña fueron realizados en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Los ensayos de laboratorio que se realizaron están de acuerdo con las Normas ASTM y son los siguientes:

#### **Ensayos Estándar**

Determinación del Contenido de Humedad	ASTM 2216
Límite Líquido y Plástico	ASTM 4318
Límite de Contracción	ASTM 427
Análisis Granulométrico	ASTM 421 – 422
Clasificación de Suelos	ASTM 2487
Peso Unitario de Suelos	ASTM 2937
Gravedad Específica de los Suelos	ASTM 854

## Ensayos Especiales

Potencial de Expansión o Asentamiento

Unidimensional de suelos Cohesivos

ASTM – D4546

Potencial de Colapso

ASTM – D5333

Algunos de los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en el Anexo III, y un resumen de los mismos se presentan en las Tablas 4-1 al 4-5, al final del presente capítulo.

### 4.3.1 Evaluación del Potencial de Expansión

Los resultados de los ensayos de expansión libre y expansión controlada llevadas a cabo en muestras extraídas del área del Cercado y del CPM San Antonio, muestran que el material areno arcilloso, con intercalaciones de lentes de arcilla altamente plástica, tienen un alto índice de expansión, que varía de 3.85% y llegando hasta el 18% cuando el material se encuentra en estado natural con bajo contenido de humedad. Este índice de expansión disminuye en función al contenido de humedad inicial de la muestra, como se observa en la siguiente tabla:

Resumen de los Resultados de los Ensayos de Expansión Libre

Calicata	Muestra	Clasificación SUCS	% de Expansión
C-1(PM SA)	MI-3	CL	9.62
C-3(PM SA)	MI-2	CH	18.11
C-5(PM SA)	MI-6	CL	14.52
C-6(PM SA)	MI-3	CL	15.43
C-10 SA	MI-1	SC	3.85
C-14 SA	Afloramiento	SC	8.63
C-19 SA	Afloramiento	CL	15.64
C-6 CM	MI-2	SC	5.54

En estos mismos ensayos se ha determinado que la carga necesaria para controlar la expansión del suelo varía entre los 3.2 kg/cm<sup>2</sup> y 4.6 kg/cm<sup>2</sup>, valores que son excesivamente altos para ser transmitidas por las cimentaciones sin generar falla por resistencia cortante del terreno. En consecuencia la alternativa de solución para este problema podría ser el establecimiento de un equilibrio entre la carga transmitida al terreno por la cimentación y las deformaciones que la estructura puede resistir debido a la

expansión remanente del suelo. Los resultados de los ensayos de expansión realizados con cargas de servicio de 0.8 kg/cm<sup>2</sup> y 1.6 kg/cm<sup>2</sup> (método B), muestran que el porcentaje de expansión varía entre 2.89% y 4.21%. El hinchamiento del material en estas condiciones es relativamente bajo y el nivel de deformación podría ser asumido por la estructura. Los resultados de los ensayos de expansión controlada se presentan en la siguiente tabla:

Calicata	Muestra	Clasificación SUCS	Método de Ensayo	% de Expansión	Carga de control (kg/cm <sup>2</sup> )
EP-2	MI-1	CL	A	7.91	4.35
EP-2	MI-1	CL	B	1.31	3.68
EP-2	MI-1	CL	C	-	3.2
C-19	Afloramiento	CL	B	2.89	
C-4	Afloramiento	CL	B	4.21	

Cabe señalar que de acuerdo a una evaluación rápida con métodos empíricos en función al LL propuestos por Dakshanamurthy y Raman (1973), así como los métodos dados por el United States Bureau of Reclamation y Sowers (1961) en función al IP, se determinan valores de potencial de expansión que varían de pequeño o bajo a moderado o medio, dado que tanto el LL como el IP de estos suelos varían de 23 a 46 y 11 a 25 respectivamente. Si bien estas correlaciones indican que el suelo de la zona evaluada presenta un potencial de expansión leve, los daños ocasionados a las estructuras debido al hinchamiento del suelo corresponden a un potencial de expansión severo, por lo que se considera que estos métodos empíricos no clasifican adecuadamente a los materiales analizados.

Es necesario acotar que, de acuerdo a los trabajos de campo y las exploraciones geotécnicas, se ha determinado que el suelo expansivo, cuyas potencias son mayores a los 4 m, se encuentra en forma superficial y subyaciendo a un material granular de espesor variable. Los problemas registrados por efecto del hinchamiento del suelo en algunas estructuras de interés social, son debido principalmente al incremento de humedad ocasionado por filtraciones de agua a través de las capas permeables superficiales, así como también por problemas de fugas de agua desde las redes abastecimiento y la percolación de las aguas servidas desde los pozos sépticos ubicados en las partes altas. Dado que estos factores son

dificiles de controlar, se sugiere considerar parámetros básicos de diseño acorde con los problemas que se manifiestan en la Zona III, que mayormente presenta este tipo de suelo.

**Tabla referencial de Métodos Empíricos**

Calicata	Muestra	LL	LP	IP	sucs	Potencial de hinchamiento (IP)	Potencial de Expansión (IP)		Grado de expansión (LL)
							Método Sower (1961)	Método USBR (1979)	Método Dakshanamurthy y Raman (1973)
C-1	M-1	27	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-1	M-2	NP	NP	0	SW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-1	M-3	23	NP	0	GW - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-2	M-1	23	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-2	M-2	28	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-2	M-3	NP	NP	0	GP	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-2	M-4	NP	NP	0	SP - SM	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-2	M-5	23	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-3	M-1	30	NP	0	SP	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-3	M-2	25	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-1	M-1	30	16	14	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-1	M-2	32	17	15	SC	Bajo	Pequeño a moderado	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-1	M-3	24	NP	0	GP - GM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-2	M-3	NP	NP	0	SP	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-3	Lente	NP	NP	0	SP	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-4	M-1	32	17	15	SC	Bajo	Pequeño a moderado	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-4	M-2	46	21	25	CL	Medio	Pequeño a moderado	Medio	Hinchamiento Medio
C-5	M-1	24	NP	0	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-6	M-1	28	16	12	GW - GC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-6	M-2	35	18	17	CL	Medio	Pequeño a moderado	Bajo	Hinchamiento Medio
C-6	M-3	30	17	13	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-6	M-4	33	18	15	SC	Bajo	Pequeño a moderado	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-6	M-5	31	14	17	GP - GC	Medio	Pequeño a moderado	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-7	M-1	30	18	12	GW - GC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-7	M-2	37	21	16	SC	Medio	Pequeño a moderado	Bajo	Hinchamiento Medio
C-7	M-3	43	25	18	CL	Medio	Pequeño a moderado	Medio	Hinchamiento Medio
C-8	M-1	29	NP	0	GP	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-8	M-2	33	NP	0	SM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-9	M-1	NP	NP	0	GP	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-9	M-2	33	21	12	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-10	M-1	31	NP	0	GP	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-12	M-1	NP	NP	0	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-13	M-2	34	19	15	CL	Bajo	Pequeño a moderado	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-15	M-1	NP	NP	0	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-15	M-2	33	20	13	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-16	M-1	NP	NP	0	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-16	M-2	33	20	13	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-17	M-1	NP	NP	0	SW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-17	M-2	35	19	16	CL	Medio	Pequeño a moderado	Bajo	Hinchamiento Medio
C-17	M-3	31	19	12	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-18	Lente	NP	NP	0	SW - SM	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-18	M-1	NP	NP	0	GW	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-19	Lente	NP	NP	0	SP - SM	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-19	M-1	31	20	11	SC	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-19	M-2	23	NP	0	SM	Bajo	Pequeño	Bajo	Bajo Hinchamiento
C-20	M-1	NP	NP	0	SP	Bajo	Pequeño	Bajo	No hay Hinchamiento
C-20	M-2	42	22	20	CL	Medio	Pequeño a moderado	Medio	Hinchamiento Medio

### **4.3.2 Evaluación del Potencial de Colapso**

Adicionalmente a los ensayos de colapso en campo, se realizaron ensayos para determinar potencial de colapso en laboratorio. Este ensayo consiste en aplicar una carga de  $1.6 \text{ kg/cm}^2$  a una muestra de suelo en estado seco. Luego de ocurrido todo el asentamiento generado por la acción de esta carga, se satura la muestra y se registra el asentamiento producido por el efecto del agua, manteniendo la carga constante. Una vez que haya cesado el asentamiento, se incrementa la carga hasta  $6.4 \text{ kg/cm}^2$  como en el caso de un ensayo de consolidación convencional. La relación entre el asentamiento sufrido por la muestra de suelo por efecto de saturación y su altura original, representa el potencial de colapso.

Los ensayos realizados en muestras de suelos provenientes del CPM San Antonio y de la zona Alta del Cercado presentan un potencial de colapso menor al 1%, por lo tanto clasifica como un suelo de bajo potencial de colapso, cuyo efecto no es significativo para las edificaciones. Por el contrario, según el contenido de material arcilloso en su matriz, estos suelos presentan un comportamiento ligeramente expansivo.

## **4.4 Perfil Estratigráfico**

La información geotécnica obtenida durante las dos campañas de exploración realizadas en el presente estudio, así como de los estudios de mecánica de suelos recopilados han permitido definir una serie de perfiles estratigráficos característicos de las diferentes zonas del área en estudio. Seguidamente se presenta una descripción de éstos para cada una de las zonas urbanas de la ciudad de Moquegua.

### **4.4.1 El Cercado de Moquegua**

El sector de El Cercado abarca la zona monumental de la ciudad así como la zona colindante con el cerro El Siglo. En este sector se excavaron 13 calicatas de hasta 4.00 m de profundidad, las cuales se encuentran convenientemente distribuidas en todo el área de estudio. Según los registros de estas calicatas, la estratigrafía de esta zona presenta superficialmente rellenos o materiales removidos con el tiempo de vida de la ciudad, conformados predominantemente por gravas con matriz limosa. La parte subyacente presenta dos tipos de suelos, cuya estratificación se encuentra en forma alternada. Uno de estos suelos está compuesto por

gravas con matriz arenosa y presencia de limos, de color marrón a beige y compacidad media a suelta en la mayor parte del área y medio densa en algunas zonas. Las partículas de gravas presentan formas subredondeadas y aplanadas en la parte alta, y redondeadas en la parte baja. En algunas excavaciones se nota presencia de humedad alrededor de 1.40 a 2.10 metros de profundidad. El otro tipo de suelo está conformado por arenas arcillosas y limosas muy densas, de color beige y baja humedad. En las zonas de mayor pendiente existen afloramientos de arenas arcillosas y limos, muy densos, y en la zona de quebradas se observan estratos intercalados casi horizontales de material granular con matriz arenosa y arenas limosas, de compacidad suelta, con presencia de tufos volcánicos y gravas con bolones de tamaño máximo de hasta 32”.

La zona que abarca la parte baja de la ciudad, un sector del valle del río Tumilaca y las urbanizaciones los Olivos, Santa Rosa, C. Mariátegui, así como también la Zona Militar y el Aeropuerto están asentados predominantemente sobre un terreno de origen fluvio aluvial, conformado por estratos alternados de gravas y arenas con limos, de color amarillo claro. La compacidad de estos materiales varía de suelta a media y se observa la presencia de bolonería de tamaños variables. Estos estratos tienen potencias mayores a los 4 metros y presentan cierta estabilidad en los cortes existentes por efecto de las sales y sulfatos que contienen. En la parte superficial estos estratos están cubiertos por un suelo de cultivo de poco espesor.

Los perfiles estratigráficos representativos de la zona de El Cercado se presentan en el Anexo IV, en las Figura PG-01 y PG-02 para la parte alta, y en la Figura PG-03 para la parte baja. La ubicación de estos perfiles se indica en el Plano P-04.

#### **4.4.2 Centro Poblado Menor San Antonio**

El Centro Poblado Menor de San Antonio está ubicado aproximadamente a 3.00 km al oeste del centro de la ciudad de Moquegua. En este sector el perfil del terreno presenta una configuración muy errática pudiéndose definir dos áreas predominantes con características geotécnicas similares. La primera está conformada por la parte central del CPM San Antonio, la cual se encuentra asentada sobre antiguos lechos de quebradas que han sido rellenados por depósitos de material gravoso. La potencia del estrato de grava superficial en esta zona es mayor a los 4.00 m de profundidad, por debajo del cual se encuentra la arcilla arenosa o arena arcillosa

característica de la formación Moquegua Inferior. La grava posee una matriz arenosa y limosa, de compacidad medio suelta y presenta lentes de arena gruesa de espesores variables. Este material presenta partículas de 5" de tamaño predominante y baja humedad. A pesar de la potencia del estrato de grava, en esta zona se observan manifestaciones de daños en las edificaciones debido a la expansión del material arcilloso subyacente.

La segunda zona que se puede representar con un perfil característico está conformada por las áreas cercanas a las laderas de los cerros que se ubican a ambos lados del CPM San Antonio. En esta zona los estratos de arcilla arenosa y arena arcillosa de la formación Moquegua Inferior se encuentran mucho más superficiales, llegando a aflorar en las laderas y partes altas de los cerros. El estrato superficial está constituido también por un material gravoso similar al encontrado en la primera zona, aunque se encuentra más estratificado con lentes de arenas gruesas y material fino. La arcilla limosa a arenosa, que generalmente constituye el terreno de fundación de las edificaciones, se encuentra en estado seco y muy rígida, siendo muy difícil de excavar por lo que los pobladores suelen humedecerla para poder excavar las zanjas para la cimentación de sus viviendas. Los resultados de los ensayos de expansión muestran que estos suelos tienen un potencial de expansión de hasta 18%, las cuales generan cargas o presiones de expansión de hasta 4.6 kg/cm<sup>2</sup>, ocasionando un serio problema a las edificaciones convencionales.

Las Figuras PG-04 al PG-08 del Anexo IV presentan los perfiles estratigráficos elaborados para esta zona. Las ubicaciones de estos perfiles se indican en Plano P-04.

#### **4.4.3 Chen Chen**

La zona de Chen Chen está conformada por pequeñas planicies intersectadas por varias quebradas secundarias y una quebrada principal que se ubica en el lado Oeste y recorre el área de estudio de Norte a Sur. En esta zona se excavaron 28 calicatas hasta una profundidad máxima de 4.00 m. La constitución del suelo es bastante uniforme, estando conformado predominantemente por un material gravoso con matriz arcillosa y limosa alternadamente.

Como se puede observar en los registros de sondajes, hasta la profundidad de exploración de 4.00 m, el suelo de fundación de esta zona consiste en un estrato homogéneo de gravas que varían de limpias a limosas y

arcillosas (GW, GM, GP, GW-GM, GP-GM y GP-GC), intercalado en algunos casos por lentes aislados de arena bien graduada y pobremente graduada, arena arcillosa y arena limosa de baja plasticidad (SW, SP, SC, SW-SM) de colores gris y beige. Este material tiene una compacidad media a suelta y muy baja humedad, encontrándose prácticamente seco. Las partículas de grava tienen forma alargada, aplanada, de borde sub redondeado a sub angular y se observa la presencia de bolones y bloques cuyos tamaños varían desde 11" hasta 38" en forma aislada. Se observa también la presencia de tufos volcánicos, los cuales en algunas zonas se encuentran cementados con sales. Esta característica del suelo hacía presuponer que este material podría presentar un comportamiento colapsable; sin embargo, los ensayos de colapso in situ realizados en esta zona han descartado tal suposición.

Dada la irregularidad topográfica de este terreno, durante los trabajos de campo se ha podido verificar que para la habilitación urbana se están realizando nivelaciones mediante cortes y rellenos, sin efectuar un tratamiento ni una conformación adecuada del material removido. Esto podría generar estratos de rellenos sueltos propensos a sufrir asentamientos que pueden ser perjudiciales para las edificaciones que se construyan sobre ellos.

Las Figuras PG-09 al PG-14 del Anexo IV muestran los perfiles estratigráficos característicos de esta zona. La ubicación de los mismos se indica en el Plano P-04

#### **4.4.4 Centro Poblado Menor Los Angeles**

El sector que abarca el Centro Poblado Menor de Los Angeles está ubicado al noreste de la ciudad de Moquegua, a una distancia de 4.20 km aproximadamente. La topografía de este sector es variada debido a que se asienta en las faldas del cerro aledaño, encontrándose pendientes mayores a 15°. La exploración geotécnica en este sector consistió en la excavación de 7 calicatas de hasta 4.00 m de profundidad.

El perfil estratigráfico del terreno de fundación es bastante homogéneo, estando conformado predominantemente por un material de relleno constituido por gravas y arenas con mezcla de limos, con espesores que varían entre 0.20 a 1.30 m. Subyaciendo a este material se encuentran



estratos de gran potencia de gravas con matriz de arena y limos, de compacidad media a suelta y partículas de formas aplanadas, alargadas y bordes angulosos a subredondeados. En algunas calicatas estas gravas se encuentran intercaladas con lentes de arena gruesa color gris y lentes de arena bien gradada de espesores de hasta 0.30 m, aparentemente cementadas por un material blanquecino. Los bloques presentan tamaños de hasta 13 pulgadas y excepcionalmente se encuentran bloques de hasta 28 pulgadas.

#### **4.4.5 Centro Poblado Menor San Francisco**

El CPM San Francisco se encuentra emplazado en las laderas de las colinas ubicadas entre El Cercado y el CPM San Antonio, presentando una topografía bastante agreste. En esta zona se realizó la excavación de un total de 7 calicatas hasta una profundidad máxima de 4.00 m.

El perfil estratigráfico del terreno de fundación en esta zona presenta un estrato superficial constituido por material de relleno, conformado predominantemente por grava limosa contaminada con basura, de compacidad suelta. El espesor de este estrato es variable según la conformación topográfica, tomando valores de 0.20 m en las partes altas hasta de 2.00 m en algunas zonas de la parte baja. Subyaciendo a este material se encuentran estratos gravas limpias, limosas y arcillosas (GW, GW-GM, GP, GP-GM, GC) de color beige a marrón, con partículas de formas alargadas, aplanadas, bordes sub angulares, de compacidad medio densa, con bloques de 6" a 10" de diámetro. En las calicatas C-3 y C-6, debajo del material de relleno se presenta un estrato de arcilla limosa rígida, de baja a mediana plasticidad y media húmeda por presencia de filtraciones. Debido a lo accidentado de la topografía no se han elaborado perfiles estratigráficos representativos para esta zona.

#### **4.5 Delimitación del Área de Estudio por Tipos de Suelo**

Los perfiles estratigráficos elaborados para las diferentes zonas del área de estudio fueron implementados en una base de datos de un sistema de información geográfica (GIS). Con esta herramienta ha sido posible visualizar con mayor claridad la variabilidad espacial de los diferentes tipos de suelos en el área en estudio, siendo posible elaborar mapas de suelos para varios niveles de profundidad. Esta información ha permitido delimitar con mayor precisión las cuatro zonas geotécnicas identificadas en la ciudad de Moquegua. El Plano P-05 muestra un mapa de tipos de suelos al nivel de 1 m de profundidad, el cual es el

nivel promedio de la profundidad de cimentación para las edificaciones de interés social.

Esta delimitación del área de estudio por tipos de suelos es una información básica para realizar el modelamiento del comportamiento del terreno en la determinación del nivel de peligro y la evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones.

#### **4.6 Determinación de la Capacidad Portante del Terreno para Edificaciones de Interés Social**

En el diseño de cimentaciones, para garantizar un comportamiento satisfactorio de las estructuras, se deben cumplir las dos condiciones siguientes:

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

En consecuencia, considerando que se cumplan estas dos condiciones, se ha realizado el cálculo de la capacidad de carga admisible para una cimentación convencional de una vivienda de interés social, consistente en un cimiento corrido de 0.60 m de ancho y profundidades de cimentación de 1.00 a 1.20 m. Para tal fin, se ha utilizado la teoría de capacidad de carga de Terzaghi, con los factores de capacidad de carga propuestos por Vesic (1973).

Para la evaluación de la capacidad de carga admisible del terreno, en función a la caracterización geotécnica realizada, se ha dividido preliminarmente el área de estudio en cuatro zonas, como se describe a continuación:

**Zona I:** Esta zona está conformada por El Cercado, las urbanizaciones aledañas y el CPM Los Angeles, cuyas estructuras están cimentadas sobre el conglomerado de la Formación Moquegua Superior y la grava fluvio-aluvial del valle. Los terrenos de fundación de esta zona presentan las mejores características geotécnicas del área de estudio.

La capacidad de carga admisible para una cimentación típica convencional en esta zona varía de 1.2 kg/cm<sup>2</sup> a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, para profundidades de cimentación de 1.00 a 1.20 m. Se considera que la cimentación debe estar desplantada sobre terreno

natural; es decir, se deberá atravesar el estrato de relleno superficial que generalmente es heterogéneo y se encuentra en estado suelto.

**Zona II:** Esta zona abarca el área denominada “Pampas de Chen Chen”, la cual ha sido seleccionada como la nueva área de expansión urbana y cuya habilitación urbana se está desarrollando rápidamente para la reubicación de los damnificados del terremoto del 23 de Junio del 2001. Litológicamente está constituido por conglomerados y areniscas intercaladas con algunos estratos de areniscas tufáceas, así como tufos depositados. La capacidad de carga admisible de una vivienda de interés social, a la profundidad de cimentación de 1.00 m, sobre el terreno natural varía de 1.2 a 1.7 Kg/cm<sup>2</sup>. Es recomendable no cimentar en el material de relleno generado durante la nivelación del terreno a menos que éste haya sido convenientemente conformado.

**Zona III .-** Conformada principalmente por el CPM San Antonio, y parte del Asentamiento Humano El Siglo. Esta zona se ha subdividido en dos zonas en función a la profundidad en que se encuentra el estrato de suelo arcilloso, que presenta características expansivas. Los valores de capacidad de carga admisible determinados para estas sub-zonas son las siguientes:

**Zona IIIA:** El terreno de fundación esta conformado por un material granular de compacidad media a suelta, el cual en algunas zonas se encuentra cubierto por estratos de rellenos de poca potencia. Subyaciendo a este material, en algunos casos a profundidades mayores a los 4.00 m, se encuentran estratos de arcillas limosas y arenosas de baja plasticidad, que presentan un moderado potencial de expansión. La capacidad de carga admisible para edificaciones de interés social varía de 1.0 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> a una profundidad de cimentación de 1.00 m. En el diseño de cimentaciones en estos tipos de suelos se debe considerar la posibilidad de asentamientos diferenciales por un leve potencial de colapso del material granular cementado, así como pequeños levantamientos por expansión de las arcillas limosas.

**Zona IIIB:** Esta zona abarca la parte lateral del CPM San Antonio, ubicado al pie y en las laderas de los cerros circundantes de esta zona urbana. El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos en las zonas bajas por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión (hasta 18% de expansión con cargas de expansión de 4.6 Kg/cm<sup>2</sup> ). La capacidad de carga admisible del terreno en condiciones saturadas varía de 0.8 a 1.0 Kg/cm<sup>2</sup> para edificaciones de interés social, con profundidades de cimentación de 1.0 m. En esta zona el problema

de expansión de suelos es severo, por lo que se debe considerar su efecto en las cimentaciones para evitar el agrietamiento de las edificaciones.

**Zona IV:** Está conformada por el área donde se ubica el CPM San Francisco y está constituida por areniscas arcóscicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro con estratificación casi horizontal. La topografía de esta zona es bastante accidentada presentando pendientes mayores a los 70°, lo cual es un elemento desfavorable para su uso como área urbana. La capacidad de carga admisible para viviendas de interés social varía de 0.6 a 0.8 kg/cm<sup>2</sup> en terreno saturado. Esta zona es propensa a sufrir grandes amplificaciones sísmicas por efectos topográficos y posibles problemas de inestabilidad de taludes.

Tabla 4-1: Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CERCADO DE MOQUEGUA

Calicata	Muestra	PROFUND. (m)	w(%)	LL	LP	IP	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C-1	M-1	0.70 - 4.10	4,60	NP	NP	NP	43,90	50,20	5,90	SW - SM
C-2	M-1	0.30 - 4.00	3,50	30,00	20,00	10,00	59,20	34,70	6,10	GW - GC
C-3	M-1	0.00 - 1.00	8,00	41,00	23,00	18,00	6,40	67,70	25,90	SC
C-4	M-1	0.40 - 1.90	5,80	32,00	22,00	10,00	57,90	33,70	8,40	GP - GC
C-4	M-2	1.90 - 2.50	5,50	40,00	23,00	17,00	65,90	25,50	8,70	GW - GC
C-5	M-1	0.00 - 2.10	3,90	NP	NP	NP	54,80	39,60	5,60	GP - GM
C-5	M-2	2.10 - 2.80	12,60	39,00	20,00	19,00	5,00	72,80	22,20	SC
C-6	M-1	0.75 - 3.80	3,30	NP	NP	NP	59,40	37,40	3,20	GW
C-7	M-1	1.00 - 2.30	15,70	40,00	21,00	19,00	3,70	55,80	40,40	SC
C-8	M-1	2.20 - 3.00	15,60	40,00	22,00	18,00	3,10	61,30	35,70	SC
C-8	M-2	3.00 - 3.80	7,30	NP	NP	NP	55,60	37,40	7,00	GP - GM
C-9 A	M-1	2.10 - 3.10	2,80	NP	NP	NP	64,80	31,30	3,90	GW
C-9 B	M-1	1.50 - 3.20	2,80	NP	NP	NP	63,10	33,80	3,00	GP
C-9 C	M-1	0.60 - 3.10	3,00	NP	NP	NP	70,90	26,70	2,40	GW
C-10	M-1	2.80 - 3.30	10,50	38,00	19,00	19,00	-	69,00	31,00	SC
C-10	M-2	3.30 - 3.80	3,80	NP	NP	NP	33,50	61,80	4,70	SP
C-10	M-3	3.80 - 4.00	14,10	39,00	22,00	17,00	4,60	73,20	22,10	SC
C-11	M-1	1.00 - 2.20	2,40	NP	NP	NP	75,10	23,80	1,10	GW
C-12	M-1	0.30 - 1.90	6,40	40,00	23,00	17,00	61,40	14,80	23,80	GC
C-12	M-2	2.10 - 3.50	2,00	NP	NP	NP	74,00	23,90	2,10	GW
C-13	M-1	0.00 - 3.00	4,20	38,00	21,00	17,00	70,10	22,90	7,00	GP - GC

- LL** = Limite liquido en porcentaje  
**LP** = Limite plástico en porcentaje  
**w(%)** = Contenido de humedad en porcentaje  
**NP.** = No plástico  
**Gr(%)** = Grava en porcentaje  
**Ar(%)** = Arena en porcentaje  
**LA(%)** = Limo arenoso en porcentaje

Tabla 4-2: Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CPM SAN ANTONIO

Calicata	Muestra	PROFUND. (m)	w(%)	LL	LP	IP	IC	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C - 1	M - 1	0.00 - 2.00	2,8	27	NP	NP	---	67,2	26	6,7	GP - GM
C - 1	M - 2	2.00 - 2.15	2,4	NP	NP	NP	---	28,5	67	4,5	SW
C - 1	M - 3	2.15 - 3.40	2,5	23	NP	NP	---	66,3	28,5	5,2	GW - GM
C - 2	M - 1	0.00 - 1.20	4,1	23	NP	NP	---	58,6	31,5	9,9	GP - GM
C - 2	M - 2	1.20 - 1.60	1,4	28	NP	NP	---	67,2	24,3	8,5	GP - GM
C - 2	M - 3	2.00 - 2.40	1,9	NP	NP	NP	---	82,4	14,7	2,9	GP
C - 2	M - 4	2.20 - 2.30	0,9	NP	NP	NP	---	9,5	80,9	9,7	SP - SM
C - 2	M - 5	1.60 - 3.00	2,7	23	NP	NP	---	57	36,2	6,9	GP - GM
C - 3	M - 1	0.00 - 0.90	2,8	30	NP	NP	---	44,3	51,6	4,1	SP
C - 3	M - 2	0.90 - 3.00	2,1	25	NP	NP	---	66,5	22,3	11,2	GP - GM
C - 1	M - 1	0.00 - 2.00	1,5	30	16	14	20	61,1	34,7	4,2	GW
C - 1	M - 2	2.00 - 2.80	4,3	32	17	15	---	0,4	61,2	38,5	SC
C - 1	M - 3	2.80 - 3.90	3,4	24	NP	NP	---	57,3	37,7	5	GP - GM
C - 2	M - 3	1.20 - 2.20	1,2	NP	NP	NP	---	46,1	50,7	3,2	SP
C - 3	Lente	2.60 - 2.80	2,9	NP	NP	NP	---	39,6	57,1	3,3	SP
C - 4	M - 1	0.00 - 1.60	5,4	32	17	15	---	28,8	51,9	19,3	SC
C - 4	M - 2	1.60 - 3.90	10,3	46	21	25	17	0	5,6	94,4	CL
C - 5	M - 1	0.00 - 4.00	1,6	24	NP	NP	---	60,9	35,8	3,3	GW
C - 6	M - 1	0.00 - 1.90	1,3	28	16	12	20	62	32,5	5,5	GW - GC
C - 6	M - 2	1.90 - 2.40	5,3	35	18	17	19	1,2	47,8	51	CL
C - 6	M - 3	2.40 - 3.00	2,8	30	17	13	20	21	58,3	20,6	SC
C - 6	M - 4	3.00 - 3.30	3,6	33	18	15	20	13,3	54,5	32,2	SC
C - 6	M - 5	3.30 - 4.00	1,7	31	14	17	19	62,3	28,6	9,1	GP - GC
C - 7	M - 1	0.00 - 2.50	0,8	30	18	12	---	52,1	42	5,9	GW - GC
C - 7	M - 2	2.50 - 2.60	6,8	37	21	16	---	0	61,7	38,3	SC
C - 7	M - 3	2.60 - 3.50	8,9	43	25	18	21	0	2,6	97,4	CL
C - 8	M - 1	0.00 - 2.70	1	29	NP	NP	---	51,6	43,5	4,9	GP
C - 8	M - 2	2.70 - 3.10	7	33	NP	NP	---	0,1	79,7	20,2	SM
C - 9	M - 1	0.00 - 1.10	1	NP	NP	NP	---	52,9	43,6	3,4	GP
C - 9	M - 2	1.10 - 2.70	8,1	33	21	12	---	0	55,8	44,2	SC
C - 10	M - 1	0.00 - 3.70	1,9	31	NP	NP	---	54,3	41,4	4,3	GP
C - 12	M - 1	0.00 - 4.00	2,9	NP	NP	NP	---	49,70	45,30	5,00	GW
C - 13	M - 2	0.60 - 2.00	9,1	34	19	15	---	-	32,70	67,30	CL
C - 15	M - 1	0.00 - 1.90	3	NP	NP	NP	---	65,10	31,40	3,50	GW
C - 15	M - 2	1.90 - 3.00	11,2	33	20	13	---	-	64,60	35,40	SC
C - 16	M - 1	0.00 - 2.10	1,8	NP	NP	NP	---	58,30	38,30	3,30	GW
C - 16	M - 2	2.10 - 3.00	10,4	33	20	13	---	-	64,70	35,30	SC
C - 17	M - 1	0.50 - 2.00	3,6	NP	NP	NP	---	38,10	57,90	4,00	SW
C - 17	M - 2	2.00 - 2.50	16	35	19	16	---	-	28,60	71,40	CL
C - 17	M - 3	2.50 - 2.60	11	31	19	12	---	0,20	76,80	23,00	SC
C - 18	Lente	2.60 - 2.70	5	NP	NP	NP	---	15,00	76,00	9,00	SW - SM
C - 18	M - 1	0.00 - 3.80	2,7	NP	NP	NP	---	69,80	27,30	2,90	GW
C - 19	Lente	0.40 - 0.60	2,8	NP	NP	NP	---	37,60	55,10	7,30	SP - SM
C - 19	M - 1	0.00 - 2.00	7,6	31	20	11	---	0,60	52,70	46,70	SC
C - 19	M - 2	2.00 - 2.50	4,2	23	NP	NP	---	-	74,40	25,60	SM
C - 20	M - 1	0.00 - 1.50	2,8	NP	NP	NP	---	39,20	57,30	3,50	SP
C - 20	M - 2	1.50 - 2.00	12,3	42	22	20	---	0,30	21,30	78,40	CL

- LL = Limite liquido en porcentaje
- LP = Limite plástico en porcentaje
- w(%) = Contenido de humedad en porcentaje
- N.P. = No plástico
- Gr(%) = Grava en porcentaje
- Ar(%) = Arena en porcentaje
- LA(%) = Limo arenoso en porcentaje

Tabla 4-3: Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CPM LOS ANGELES

Calicata	Muestra	PROFUND. (m)	w(%)	LL	LP	IP	IC	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C - 1	M - 1	1.30 - 3.30	2,6	NP	NP	NP	---	58	38,1	3,9	GW
C - 1	M - 2	3.30 - 3.40	2,3	26	NP	NP	---	63	30,3	6,8	GW - GM
C - 2	M - 1	0.00 - 3.70	2,6	22	NP	NP	---	60,6	31	8,4	GW - GM
C - 2	M - 2	3.70 - 3.90	0,4	NP	NP	NP	---	3,9	91,8	4,4	SP
C - 3	M - 1	0.00 - 3.90	2,3	26	NP	NP	---	68	23,7	8,3	GP - GM
C - 4	M - 1	0.00 - 3.80	2,4	31	21	10	---	68,7	19,1	12,1	GC
C - 5	M - 1	0.00 - 1.35	2,6	34	NP	NP	---	55,6	37,4	7	GW - GM
C - 5	M - 2	1.60 - 4.00	1,5	22	NP	NP	---	69,6	22	8,4	GP - GM
C - 6	M - 1	0.00 - 3.60	0,8	25	NP	NP	---	64,1	28,2	7,6	GP - GM
C - 7	M - 1	0.00 - 1.80	2,9	24	NP	NP	---	60,5	34,3	5,2	GW - GM
C - 7	M - 2	1.80 - 3.80	3,4	23	NP	NP	---	65,5	24	10,5	GP - GM
C - 1	M - 1	0.00 - 2.00	2,8	27	NP	NP	---	67,2	26	6,7	GP - GM
C - 1	M - 2	2.00 - 2.15	2,4	NP	NP	NP	---	28,5	67	4,5	SW
C - 1	M - 3	2.15 - 3.40	2,5	23	NP	NP	---	66,3	28,5	5,2	GW - GM
C - 2	M - 1	0.00 - 1.20	4,1	23	NP	NP	---	58,6	31,5	9,9	GP - GM
C - 2	M - 2	1.20 - 1.60	1,4	28	NP	NP	---	67,2	24,3	8,5	GP - GM
C - 2	M - 3	2.00 - 2.40	1,9	NP	NP	NP	---	82,4	14,7	2,9	GP
C - 2	M - 4	2.20 - 2.30	0,9	NP	NP	NP	---	9,5	80,9	9,7	SP - SM
C - 2	M - 5	1.60 - 3.00	2,7	23	NP	NP	---	57	36,2	6,9	GP - GM
C - 3	M - 1	0.00 - 0.90	2,8	30	NP	NP	---	44,3	51,6	4,1	SP
C - 3	M - 2	0.90 - 3.00	2,1	25	NP	NP	---	66,5	22,3	11,2	GP - GM

- LL = Limite liquido en porcentaje
- LP = Limite plástico en porcentaje
- w(%) = Contenido de humedad en porcentaje
- N.P. = No plástico
- Gr(%) = Grava en porcentaje
- Ar(%) = Arena en porcentaje
- LA(%) = Limo arenoso en porcentaje

Tabla 4-4(a): Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CHEN CHEN

Calicata	Muestra	PROFUND (m)	w(%)	LL	LP	IP	IC	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C - 1	M - 1	0.00 - 0.60	0,30	30,00	NP	NP	---	62,90	28,80	8,20	GW - GM
C - 1	M - 2	0.60 - 3.50	0,30	21,00	NP	NP	---	68,70	26,90	4,30	GW
C - 2	M - 1	0.00 - 1.10	0,50	33,00	NP	NP	---	56,40	30,40	13,20	GM
C - 2	M - 2	1.10 - 2.60	0,40	24,00	NP	NP	---	69,00	25,40	5,50	GP - GM
C - 2	M - 3	2.60 - 3.90	0,30	23,00	NP	NP	---	68,10	25,00	6,90	GP - GM
C - 2	M - 4	3.90 - 4.00	0,50	27,00	19,00	8,00	---	50,30	30,30	19,40	GC
C - 3	M - 1	0.00 - 1.60	0,40	28,00	NP	NP	---	62,80	31,50	5,70	GW - GM
C - 3	M - 2	1.60 - 2.80	0,90	20,00	NP	NP	---	53,90	41,90	4,30	GW
C - 4	M - 1	0.00 - 2.20	0,40	24,00	NP	NP	---	64,70	29,70	5,50	GW - GM
C - 4	M - 2	2.20 - 2.40	1,30	NP	NP	NP	---	15,10	82,10	2,80	SW
C - 4	M - 3	2.40 - 3.80	0,50	21,00	NP	NP	---	73,90	21,20	4,90	GP
C - 5	M - 1	0.00 - 0.50	1,10	29,00	NP	NP	---	61,70	23,80	14,50	GM
C - 5	M - 2	0.50 - 2.10	0,80	27,00	NP	NP	---	66,30	27,60	6,10	GW - GM
C - 5	M - 3	2.10 - 3.80	0,30	23,00	NP	NP	---	72,30	22,20	5,50	GP - GM
C - 6	M - 1	0.00 - 1.10	0,60	31,00	NP	NP	---	69,10	24,50	6,40	GP - GM
C - 6	M - 2	1.10 - 2.90	0,90	28,00	NP	NP	---	76,30	18,00	5,70	GP - GM
C - 6	M - 3	2.90 - 3.15	2,70	45,00	22,00	23,00	20,00	35,40	35,80	28,90	SC
C - 6	M - 4	3.15 - 3.85	0,90	38,00	21,00	17,00	22,00	71,10	21,20	7,70	GP - GC
C - 7	M - 1	0.00 - 0.60	1,60	28,00	NP	NP	---	63,80	29,90	6,30	GP - GM
C - 7	M - 2	0.60 - 2.50	0,60	32,00	NP	NP	---	68,90	25,70	5,30	GP - GM
C - 7	M - 3	2.50 - 3.60	0,70	23,00	NP	NP	---	67,90	27,40	4,70	GW
C - 8	M - 1	0.00 - 0.70	1,40	30,00	NP	NP	---	45,90	28,60	25,50	GM
C - 8	M - 2	0.70 - 3.60	0,50	29,00	NP	NP	---	69,90	22,90	7,20	GP - GM
C - 10	M - 1	0.00 - 1.10	1,20	35,00	NP	NP	---	71,50	21,80	6,70	GP - GM
C - 10	M - 2	1.10 - 3.80	1,20	28,00	NP	NP	---	54,30	27,50	18,20	GM
C - 11	M - 1	0.00 - 0.80	2,60	37,00	21,00	16,00	19,00	48,50	36,50	15,10	GC
C - 11	M - 2	0.80 - 1.40	1,60	30,00	NP	NP	---	62,40	33,10	4,50	GW
C - 11	M - 3	1.40 - 1.80	0,80	32,00	NP	NP	---	71,10	21,90	7,00	GP - GM
C - 11	M - 4	1.80 - 2.20	1,20	NP	NP	NP	---	44,00	54,00	2,00	SW
C - 12	M - 1	0.00 - 0.40	1,30	26,00	NP	NP	---	63,50	27,70	8,80	GW - GM
C - 12	M - 2	0.40 - 4.00	0,80	22,00	NP	NP	---	70,70	25,20	4,10	GW
C - 13	M - 1	0.00 - 0.80	5,00	NP	NP	NP	---	32,00	45,40	22,60	SM
C - 13	M - 2	0.80 - 4.00	0,90	28,00	NP	NP	---	69,10	23,90	7,00	GP - GM
C - 14	Lente 1	1.90 - 1.95	4,50	31,00	NP	NP	---	9,10	58,50	32,40	SM
C - 14	Lente 2	2.35 - 2.45	1,70	26,00	NP	NP	---	45,60	50,30	4,20	SW
C - 14	M - 1	0.00 - 0.70	2,30	34,00	NP	NP	---	49,50	29,00	21,50	GM
C - 14	M - 2	0.70 - 1.25	1,90	34,00	NP	NP	---	48,20	34,40	17,40	GM
C - 14	M - 3	1.25 - 2.80	0,80	37,00	NP	NP	---	64,50	25,40	10,10	GP - GM
C - 14	M - 4	2.80 - 3.30	2,00	31,00	NP	NP	---	61,50	25,50	13,00	GM
C - 15	Lente 1	1.40 - 1.45	4,30	36,00	NP	NP	---	16,30	57,20	26,40	SM
C - 15	Lente 2	2.05 - 2.15	1,40	27,00	NP	NP	---	57,40	38,30	4,30	GW
C - 15	M - 1	0.00 - 0.50	1,90	32,00	NP	NP	---	57,10	27,50	15,40	GM



Tabla 4-4(b): Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CHEN CHEN

Calicata	Muestra	PROFUND (m)	w(%)	LL	LP	IP	IC	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C- 15	M- 2	0.50 - 1.60	0,70	37,00	NP	NP	---	71,30	21,40	7,20	GP - GM
C- 15	M- 3	1.60 - 3.00	0,60	27,00	NP	NP	---	67,30	28,80	3,90	GW
C- 16	M- 1	0.00 - 0.70	1,30	34,00	NP	NP	---	55,00	35,20	9,70	GW - GM
C- 16	M- 2	0.70 - 4.10	1,30	24,00	NP	NP	---	62,00	31,70	6,30	GW - GM
C- 16	M- 3	1.40 - 1.60	0,80	NP	NP	NP	---	40,70	56,90	2,40	SP
C- 16	M- 4	1.70 - 1.90	1,50	30,00	21,00	9,00	21,00	59,00	30,60	10,40	GP - GC
C- 17	M- 1	0.00 - 0.70	1,20	35,00	NP	NP	---	71,30	20,00	8,70	GP - GM
C- 17	M- 2	0.70 - 1.70	1,20	25,00	NP	NP	---	50,40	45,10	4,50	GW
C- 17	M- 3	1.70 - 2.20	2,10	37,00	23,00	14,00	25,00	61,60	24,80	13,60	GC
C- 17	M- 4	2.20 - 3.90	1,50	28,00	NP	NP	---	61,20	32,50	6,30	GP - GM
C- 18	M- 1	0.00 - 1.30	1,80	36,00	NP	NP	---	60,40	30,50	9,10	GW - GM
C- 18	M- 2	1.30 - 3.20	1,60	41,00	24,00	17,00	26,00	74,30	16,30	9,40	GP - GC
C- 19	M- 1	0.00 - 0.50	1,10	35,00	NP	NP	---	64,80	30,10	5,10	GP - GM
C- 19	M- 2	0.50 - 1.10	1,00	NP	NP	NP	---	54,70	42,00	3,30	GP
C- 19	M- 3	1.10 - 1.70	1,80	35,00	26,00	9,00	26,00	69,70	18,30	12,10	GM
C- 19	M- 4	1.70 - 3.90	0,90	NP	NP	NP	---	67,80	28,90	3,30	GW
C- 19	M- 5	1.95 - 2.00	1,50	NP	NP	NP	---	1,90	69,20	28,90	SM
C- 20	Lente 1	2.30 - 2.40	1,10	26,00	NP	NP	---	74,20	20,90	4,90	GP
C- 20	M- 1	0.00 - 0.60	1,00	26,00	NP	NP	---	57,40	33,20	9,40	GW - GM
C- 20	M- 2	0.60 - 2.30	1,10	24,00	NP	NP	---	59,60	36,20	4,20	GW
C- 20	M- 3	2.40 - 3.90	1,40	24,00	NP	NP	---	66,00	28,40	5,60	GP - GM
C- 21	M- 1	0.00 - 0.80	1,90	35,00	NP	NP	---	63,60	22,90	13,50	GM
C- 21	M- 2	0.80 - 1.40	3,20	36,00	NP	NP	---	59,80	25,80	14,40	GM
C- 21	M- 3	1.40 - 2.30	1,60	28,00	NP	NP	---	59,30	31,00	9,70	GP - GM
C- 21	M- 4	2.30 - 2.70	1,30	NP	NP	NP	---	39,40	56,90	3,70	SW
C- 21	M- 5	2.70 - 4.00	0,90	NP	NP	NP	---	70,60	26,30	3,10	GW
C- 22	M- 1	0.00 - 0.35	1,90	21,00	NP	NP	---	43,80	25,50	30,70	GM
C- 23	M- 3	3.00 - 3.15	3,30	28,00	18,00	10,00	---	31,60	44,70	23,70	SC
C- 24	M- 2	0.25 - 1.00	2,20	28,00	NP	NP	---	59,70	25,20	15,10	GM
C- 24	M- 3	1.00 - 1.90	1,60	27,00	NP	NP	---	59,50	32,30	8,20	GW - GM
C- 25	M- 1	0.00 - 0.70	1,10	26,00	NP	NP	---	59,90	30,80	9,30	GW - GM
C- 26	M- 1	0.00 - 1.00	2,60	29,00	NP	NP	---	64,30	23,80	12,00	GP - GM
C- 27	Lente 1	0.55 - 0.60	1,30	NP	NP	NP	---	0,50	90,10	9,30	SW - SM
C- 27	M- 3	1.50 - 2.70	1,90	32,00	16,00	16,00	---	53,50	32,70	13,80	GC
C- 28	M- 1	0.00 - 0.60	1,00	23,00	NP	NP	---	70,80	21,00	8,20	GP - GM
C- 28	Lente 1	0.60 - 0.70	3,30	33,00	NP	NP	---	4,20	27,30	68,50	ML
C- 28	M- 6	2.60 - 2.65	3,60	22,00	NP	NP	---	0,60	55,70	43,70	SM
C- 28	M- 4	3.00 - 3.30	1,80	26,00	NP	NP	---	57,70	34,10	8,30	GW - GM
C- 30	M- 2	0.30 - 1.00	2,20	31,00	NP	NP	---	63,80	29,10	7,10	GP - GM
C- 30	M- 4	1.80 - 4.00	1,70	29,00	17,00	12,00	---	60,50	30,40	9,10	GP - GC

- LL = Limite liquido en porcentaje
- LP = Limite plástico en porcentaje
- w(%) = Contenido de humedad en porcentaje
- N.P. = No plástico
- Gr(%) = Grava en porcentaje
- Ar(%) = Arena en porcentaje
- LA(%) = Limo aenoso en porcentaje

Tabla 4-5: Resumen de los Resultados Estándar de Laboratorio

CPM SAN FRANCISCO

Calicata	Muestra	PROFUND. (m)	w(%)	LL	LP	IP	IC	Gr(%)	Ar(%)	LA(%)	sucs
C - 1	M - 1	0.20 - 2.00	1,00	24,00	NP	NP	—	53,20	41,40	5,40	GP - GM
C - 1	M - 2	2.00 - 2.80	1,00	23,00	NP	NP	—	63,00	32,10	4,90	GP
C - 2	M - 1	0.60 - 4.00	1,10	24,00	NP	NP	—	62,20	33,50	4,30	GP
C - 3	M - 1	1.80 - 3.85	13,60	38,00	20,00	18,00	—	-	48,60	51,40	CL
C - 4	M - 1	1.00 - 2.30	1,80	21,00	NP	NP	—	63,70	31,00	5,30	GW - GM
C - 4	M - 2	2.30 - 3.50	3,30	32,00	17,00	15,00	—	61,10	30,30	8,70	GW - GC
C - 5	M - 1	0.60 - 2.50	2,70	NP	NP	NP	—	61,70	35,50	2,90	GW
C - 6	M - 1	2.00 - 2.50	11,30	33,00	18,00	15,00	—	-	49,40	50,60	CL
C - 7	M - 1	0.30 - 4.00	3,90	33,00	19,00	14,00	—	58,50	31,70	9,90	GW - GC

- LL** = Limite liquido en porcentaje  
**LP** = Limite plástico en porcentaje  
**w(%)** = Contenido de humedad en porcentaje  
**NP.** = No plástico  
**Gr(%)** = Grava en porcentaje  
**Ar(%)** = Arena en porcentaje  
**LA(%)** = Limo aenoso en porcentaje

## CAPITULO 5

# EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS SUELOS

### 5.1 Introducción

Para evaluar las características dinámicas del terreno en la ciudad de Moquegua se ha realizado la medición de microtrepidaciones en 150 puntos distribuidos uniformemente en todo el área urbana y las zonas de expansión. Esta técnica ha sido ampliamente usada en trabajos de microzonificación sísmica dando muy buenos resultados. El procesamiento de la información se ha realizado utilizando el método de Nakamura, el cual consiste en determinar la relación de espectros de Fourier de las componentes horizontales entre el de la componente vertical (relación H/V). El método de Nakamura ha dado muy buenos resultados en la evaluación de los registros de microtrepidaciones obtenidos en esta ciudad, donde se observa que hay importantes efectos dinámicos, observándose importantes amplificaciones en periodos intermedios a largos.

Los resultados obtenidos por la técnica de medición de microtrepidaciones muestran un comportamiento dinámico particular en las distintas zonas del área de estudio. Para corroborar dicho comportamiento, se ha realizado también un análisis de los registros sísmicos obtenidos en la ciudad de Moquegua durante el evento principal y las réplicas del terremoto del 23 de Junio del 2001, con lo cual se ha podido validar los resultados obtenidos y definir las características dinámicas de las zonas geotécnicas identificadas.

### 5.2 Análisis del Registro Sísmico Obtenido en la Ciudad de Moquegua Durante el Terremoto del 23 de Junio del 2001

El CISMID posee una red de acelerógrafos instalados en las principales ciudades del país. Esta instrumentación permite obtener información de movimientos fuertes con fines ingenieriles. En la región sur se cuenta con estaciones de observación sísmica en las ciudades de Tacna, Moquegua, Arequipa, Ica, Ayacucho y Cuzco. Estas estaciones están instaladas en campo libre y en la superficie del terreno. En la ciudad de Moquegua, el acelerógrafo modelo RION SM-10, está instalado sobre un potente suelo aluvial, en el valle del Río Tumulaca.

El evento principal del terremoto del 23 de Junio solamente fue registrado en la estación de Moquegua, y varios registros de réplicas de este evento se han obtenido en algunas de las estaciones indicadas. Lermo et al (2002) instalaron también una red portátil de 3 acelerógrafos donde registraron importantes réplicas de este terremoto. La información obtenida por estas redes, si bien es cierto es bastante limitada, permite entender mejor el comportamiento dinámico de los lugares donde fue registrada. Seguidamente se hace un análisis del registro sísmico obtenido en la estación Moquegua, ubicada en el complejo recreativo del CTAR MOQUEGUA.

### **5.2.1 Tiempo Historia de Aceleraciones**

El registro tiempo historia de aceleraciones obtenido en la estación Moquegua consiste de tres componentes orientadas en las direcciones Este-Oeste, Norte-Sur y Vertical. El acelerograma tiene una longitud total de 200 segundos, y presenta una aceleración máxima de  $295.3 \text{ cm/seg}^2$ , (0.30 g) en la componente Este – Oeste. En la componente Norte - Sur, la aceleración pico registrada alcanza los  $220 \text{ cm/seg}^2$  y en la componente vertical los  $169.6 \text{ cm/seg}^2$ . La fase intensa del movimiento tiene una duración de aproximadamente 35 segundos, en el cuál las aceleraciones registraron valores por encima de los  $100 \text{ cm/seg}^2$ . La Figura 5-1 muestra las tres componentes del registro de aceleraciones obtenido en la estación de Moquegua.

La gran intensidad y duración del movimiento que presenta este registro se debe al efecto de directividad de la ruptura de la fuente, la cual, según la distribución de las réplicas, se propagó a lo largo de una longitud aproximada de 300 km, desde la zona epicentral al noroeste de Ocoña, en dirección Sudeste, generando la concentración de la energía liberada directamente hacia la zona de Moquegua.

### **5.2.2 Espectros de Respuesta Elástica**

Para analizar el contenido de frecuencias de este evento y determinar el rango de periodos donde se generan amplificaciones sísmicas, se calcularon los espectros de amplitudes de Fourier y de respuesta elástica para un factor de amortiguamiento de 5%, respectivamente. Los resultados muestran que la señal sísmica presenta un periodo predominante de 0.8 segundos, con importantes amplificaciones en un rango de periodos que varía entre 0.1 y 1.0 segundos. Esta importante amplificación en un rango de periodos relativamente grande habría originado el derrumbe de múltiples estructuras cuyos periodos de vibración se encuentran dentro de este rango. La Figura 5-2 muestra los

espectros de respuesta elásticos de cada una de las componentes de este registro.

Lermo et al (2002) mediante un análisis de los registros de réplicas obtenidos en la ciudad de Moquegua concluyen que la zona donde está instalado el acelerógrafo presenta amplificaciones importantes, los cuales se ven reflejados en el registro del evento principal. Si bien es cierto que el tipo de suelo en este lugar correspondería a un Suelo tipo II del código de diseño sismorresistente, las amplificaciones observadas durante este evento ocurren en un rango de periodos mucho mayor a los 0.6 seg. especificado para este tipo de suelo.

### **5.3 Medición de Microtrepidaciones en la Ciudad de Moquegua**

La técnica de medición de microtrepidaciones ha sido utilizada desde principios del siglo XX para determinar las propiedades dinámicas del terreno. Omori (1908) inició las investigaciones sobre microtrepidaciones empleando un instrumento muy simple para observar la vibración natural del suelo que no correspondía a una vibración sísmica ni a alguna oscilación pulsatoria y encontró que dicha vibración natural podría ser causada por el viento, ondas, o perturbaciones artificiales como el tráfico, vibración de máquinas, etc. Para definir este tipo de vibraciones, que tiene periodos cortos y sus amplitudes son más pequeñas que las oscilaciones pulsatorias, Omori utilizó el término de "microtrepidaciones".

Desde que el terremoto de California del 18 de Mayo de 1940 fue registrado exitosamente en la estación en "El Centro", los estudios dinámicos sobre el diseño sismo-resistente de estructuras fueron desarrollados muy rápidamente. Estos estudios también comprendieron las características vibratorias del suelo, apareciendo así la medición de microtrepidaciones como un procedimiento adecuado por su facilidad y rapidez.

Desde entonces se han llevado a cabo estudios extensivos sobre la relación entre las microtrepidaciones y los daños sísmicos. En este aspecto, se puntualizaba la importancia de la relación entre el llamado período predominante y la estructura del suelo. Yamahara (1969), después del terremoto del Tokachi-Oki de 1968, indicó que el daño sísmico no estaba relacionado únicamente al período predominante sino también a la forma del espectro de potencia y presentó el concepto de período selectivo. Huamán (1991) después de modelar perfiles típicos de suelos en La Punta y Callao, realizó el análisis de la respuesta dinámica de los suelos bajo movimientos sísmicos severos obteniendo que los espectros de respuesta de aceleraciones presentan periodos predominantes aproximadamente igual a 1.85 veces el

valor medido por microtrepidaciones. Actualmente se sabe que el periodo predominante del suelo determinado por medición de microtrepidaciones tiene una gran correlación con los efectos de sitio, aún cuando la respuesta dinámica del terreno durante movimientos severos no es exactamente predicha por el análisis de las microtrepidaciones. Esta técnica de medición de microtrepidaciones ha sido utilizada en el presente estudio para determinar las características dinámicas del terreno de fundación en la ciudad de Moquegua.

### **5.3.1 Descripción del Equipo**

Existen una serie de equipos de medición de microtrepidaciones, los cuales esencialmente cuentan con los mismos componentes, variando frecuentemente en los dispositivos de almacenamiento, visualización y procesamiento de los datos. El Laboratorio Geotécnico del CISMID posee un moderno sistema de adquisición de datos de prospección sísmica, GEODAS 10, el cual tiene las siguientes características:

- 16 canales de entrada, cada uno con un convertidor A/D individual con resolución 24bit y alta velocidad de muestreo.
- Computadora portátil, Toshiba SS-3480, CPU Pentium III 600MHz. RAM 64MB y Disco Duro de 12GB.
- 5 Sensores triaxiales "GEODAS-10, CR4,5-1" de 1 segundo de periodo natural
- Cable conectores de 50m de longitud  
Batería de 12V.

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

### **5.3.2 Procedimiento del Ensayo**

Las mediciones de microtrepidaciones son realizadas sobre la superficie del terreno o a diferentes profundidades dentro de una perforación, utilizando sensores suficientemente sensibles. Estas mediciones registran las velocidades de las microtrepidaciones, las que luego son almacenadas en forma digital, para su posterior procesamiento en gabinete. Para realizar la medición se instala el sensor triaxial en la

superficie del terreno, orientando sus componentes horizontales en las direcciones E-W y N-S. Luego de conectar e instalar todo el equipo se procede a registrar las microtrepidaciones por un lapso de tiempo lo suficientemente largo para garantizar que se registren tramos de ondas sin interferencias directas por el paso de vehículos o personas en las zonas próximas al sensor.

En la ciudad de Moquegua se realizó la medición de microtrepidaciones en 150 puntos distribuidos uniformemente en todo el área de estudio. La localización de estos puntos se presenta en el Plano de Ensayos Geofísicos (P-06). Los registros de las microtrepidaciones obtenidos en los puntos representativos de cada zona se presentan en el Anexo V.

### **5.3.3 Evaluación e Interpretación de las Mediciones**

Usualmente la interpretación de los registros de microtrepidaciones se realiza a través del análisis de amplitudes espectrales. Este procedimiento consiste en convertir la señal analógica a una señal digital discreta, para luego aplicarle la Transformada de Fourier y obtener el periodo predominante, el cual presenta la mayor amplitud espectral. Para eliminar el efecto de la fuente de generación de las vibraciones, Nakamura (1989) propone evaluar la relación espectral H/V, la cual representa mejor el comportamiento dinámico del perfil del terreno. En el presente estudio, dado que el equipo GEODAS 10 está implementado con un software de procesamiento de datos que incluye ambos procedimientos, se ha realizado el análisis utilizando estas dos metodologías para el procesamiento de las señales, encontrándose que la relación espectral H/V propuesta por Nakamura define con mayor claridad tanto el periodo de vibración fundamental como el rango de amplificaciones presentadas por el terreno. Los gráficos de las relaciones espectrales H/V de los puntos seleccionados para cada zona se presentan en el Anexo V, conjuntamente con un segmento de onda correspondiente.

### **5.3.4 Definición de Curvas Isoperiodos**

Las curvas isoperiodos de las diferentes zonas del área urbana fueron definidas en función a los resultados de periodos predominantes obtenidos en 107 puntos de medición de microtrepidaciones que cubren los diferentes tipos de suelos, como se observa en el Plano P-06. Excepto para las zonas de El Cercado y Los Angeles, los resultados presentan valores de periodos predominantes relativamente altos, superiores a los esperados en los tipos de suelos analizados. Un comportamiento particularmente anómalo se observa en la zona de

Chen Chen, donde los periodos predominantes en el sector de la planta de tratamiento de agua presentan valores alrededor de 0.1 s, correspondientes a un suelo muy rígido, sin embargo en otro sector muy próximo y sin aparente discontinuidad geológica, se encuentran valores de periodos predominantes alrededor de 1.0 s y con amplificaciones importantes en este rango de periodos. El Plano P-07 muestra las curvas isoperiodos definidas para las diferentes zonas de la ciudad. De este plano se desprenden las siguientes observaciones:

En la zona de El Cercado las urbanizaciones aledañas, los periodos predominantes de vibración natural varían de 0.1 a 0.35 segundos, observándose amplificaciones importantes en este rango de periodos.

En el CPM San Antonio se observan dos áreas con rangos bien definidos de valores de periodos predominantes, la primera con valores que varían de 0.2 a 0.35 s, distribuidos generalmente en las laderas de los cerros. La segunda con valores que varían de 0.4 a 0.8 s, distribuidos en la parte baja de este centro poblado.

En e CPM Los Angeles se presentan valores predominantes con poco rango de variación, encontrándose entre 0.2 y 0.3 s, los cuales corresponden al tipo de material que conforma esta zona.

En la zona de Chen Chen, también se presentan dos áreas bien marcadas, con valores de periodos bastante diferentes. El sector donde se encuentra ubicada la planta de tratamiento presenta valores de periodos predominantes en el rango de 0.1 a 0.3 s, con factores de amplificación muy pequeños, reflejando un comportamiento de suelo rígido. La zona destinada a la expansión urbana presenta valores de periodos en el rango de 0.9 a 1.5 s, con factores de amplificación importantes en este rango de periodos.

En el CPM San Francisco los periodos predominantes varían de 0.20 a 0.35 s. En esta zona las amplificaciones son importantes especialmente por el efecto topográfico y las grandes pendientes de las laderas de los cerros.

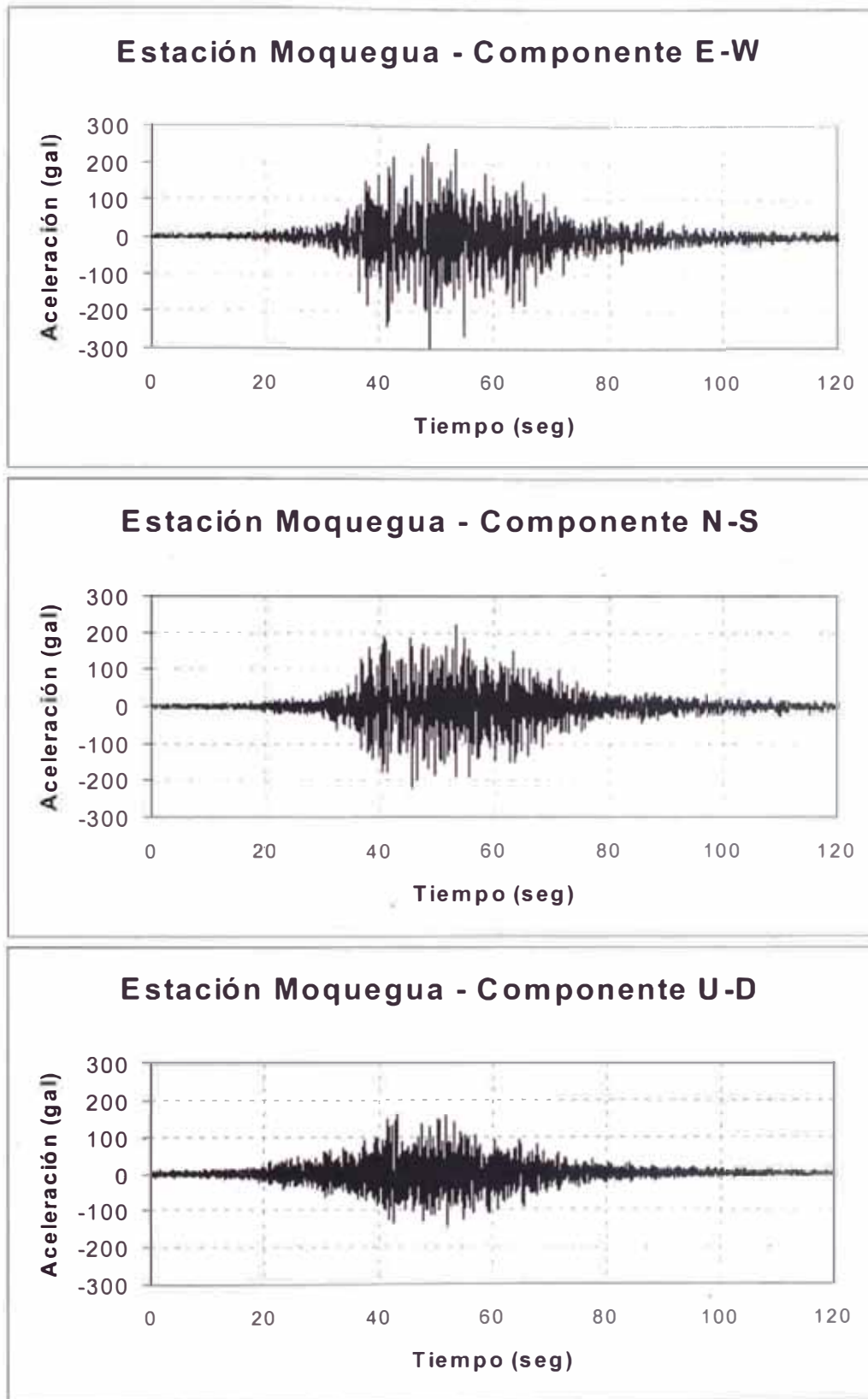
#### **5.4 Discusión de Resultados**

Las mediciones de microtrepidaciones en la ciudad de Moquegua han permitido caracterizar el comportamiento dinámico del terreno de fundación. Según los resultados de estos ensayos se concluye que en la mayor parte del área urbana se esperan amplificaciones importantes en un rango de periodos

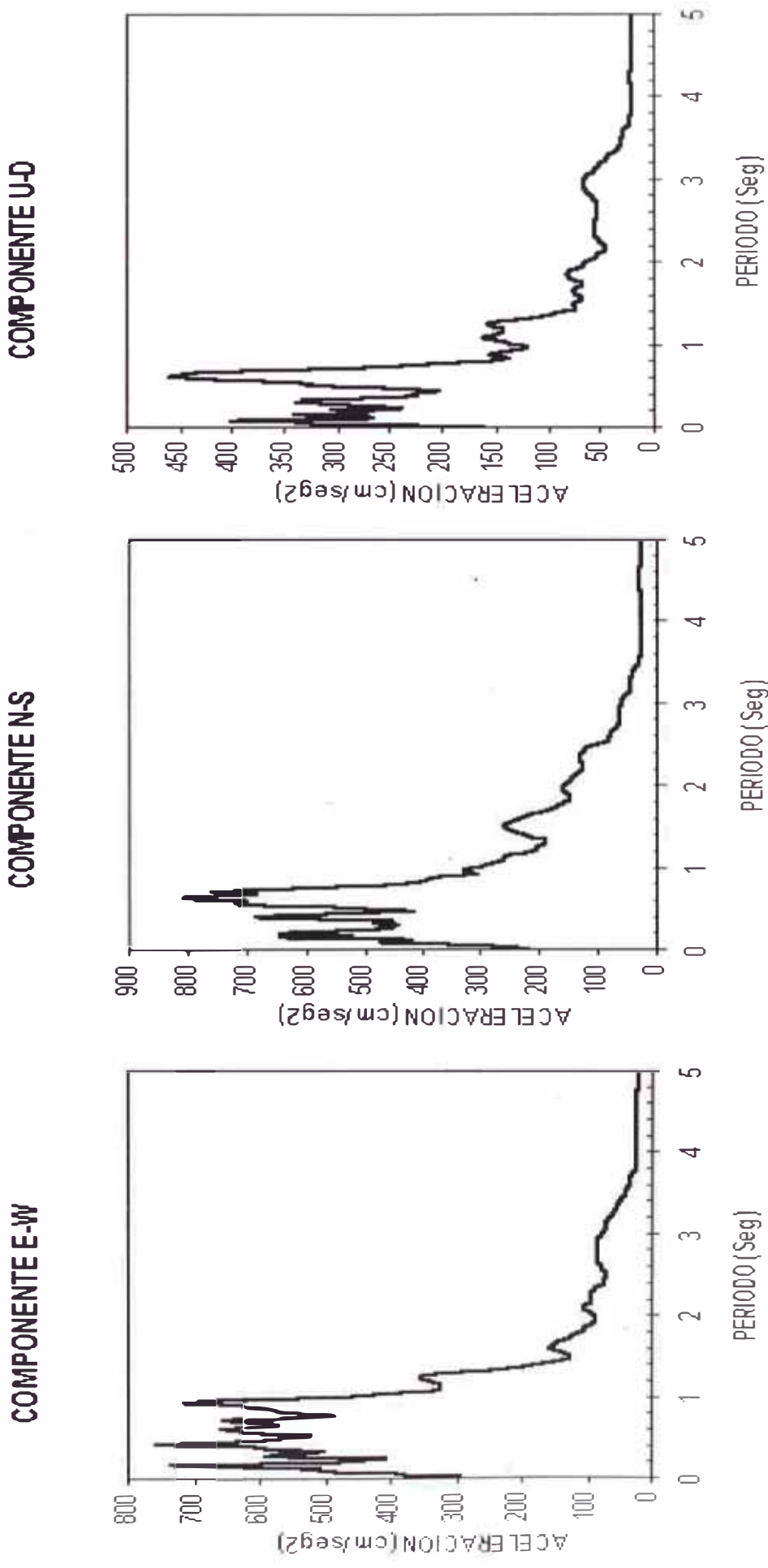


relativamente largos. Este comportamiento ha sido confirmado con el análisis de los registros sísmicos del evento principal y las réplicas obtenidos en esta ciudad durante el terremoto del 23 de Junio del 2001.

En la zona de Chen Chen, destinada para la expansión urbana, se ha determinado un comportamiento dinámico bastante particular, definiéndose dos sectores con periodos de vibración diferentes. El sector donde se ubica la planta de tratamiento de agua presenta un periodo predominante que varía entre 0.1 y 0.3 s. Las relaciones espectrales obtenidos de las mediciones de microtrepidaciones en este sector son relativamente planos, mostrando un factor de amplificación pequeño; reflejando el comportamiento de un suelo firme. Sin embargo, en el sector adyacente, donde se emplaza el área de expansión urbana, las vibraciones ambientales muestran periodos predominantes entre 0.9 y 1.5 s, con importantes amplificaciones en este rango de periodos. Lermo et al (2002) reportan que la estación ubicada sobre un conglomerado compacto en la zona Chen Chen registra las menores amplificaciones, por lo cual es tomada como estación de referencia. Este resultado es coherente con lo encontrado en este estudio, si se tiene en cuenta que la estación fue ubicada en el taller de CTAR Moquegua, en el sector de la planta de tratamiento de agua. Según la referencia indicada, los registros de réplicas obtenidas en otras zonas de la ciudad, presentan amplificaciones importantes del orden de 5 a 10 veces en el rango de periodos de 0.05 a 0.5 s, obteniéndose las mayores amplificaciones en la zona de San Antonio. Estos resultados corroboran lo encontrado en el presente estudio mediante la medición de microtrepidaciones.



**Figura 5-1:** Tiempo Historia de Aceleraciones del Sismo de Ocoña del 23/06/01 (Mw 8.4) Aceleración Máxima: **E-W** 295.3 gal, **N-S** 220.0 gal, **U-D** 160.6 gal



**Figura 5.2:** Espectros de Respuesta de Aceleraciones del Sismo de Atico en la Estación Moquegua (Componente E-W)

## CAPÍTULO 6

# ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MOQUEGUA

### 6.1 Introducción

La ciudad de Moquegua por su característica topográfica y geotécnica no tiene grandes áreas de terreno para la expansión urbana, y su crecimiento está dado por núcleos independientes adecuados a la topografía existente. A esto se suma que esta ciudad está asentada en una zona de alta actividad sísmica, donde periódicamente se producen sismos de gran magnitud, como el ocurrido el 23 de Junio de 2001 ( $M_w = 8.2$ ) frente a la ciudad de Ocoña – Arequipa.

Con la finalidad de contribuir a un crecimiento seguro y ordenado de esta ciudad, en el presente estudio se realiza la zonificación geotécnica sísmica de la ciudad de Moquegua. Este trabajo se ha realizado sobre la base de los estudios geológicos, geotécnicos y sísmicos documentados en los capítulos precedentes, así como de la revisión de estudios particulares de mecánica de suelos recopilados para esta investigación. El área de influencia del presente estudio es el ámbito urbano de la ciudad de Moquegua comprendida por la Zona Monumental, El Siglo, Mariscal Nieto; Los Centros Poblados Menores de San Francisco, San Antonio, Los Ángeles y la nueva área de expansión urbana de Chen Chen.

### 6.2 Características Geotécnicas en Condiciones Estáticas

La ciudad de Moquegua se ha zonificado en cuatro zonas geotécnicas que representan adecuadamente el comportamiento de los suelos de fundación ante las sollicitaciones externas. Cada una de estas zonas agrupa áreas con características geotécnicas similares, variando desde la Zona I, constituido por el terreno más competente del área urbana y con menores niveles de peligros ante fenómenos naturales, hasta la Zona IV conformado por terrenos menos adecuados para la cimentación de edificaciones convencionales y con mayores niveles de peligros.

La delimitación de estas zonas está basada en toda la información procesada en este estudio, para lo cual no sólo se han elaborado los perfiles estratigráficos y sísmicos descritos en el capítulo anterior, sino que además, con la ayuda de herramientas de información geográficas se han elaborados mapas donde se

puede diferenciar los tipos de suelo de fundación a diferentes niveles de profundidad en función a sus características geotécnicas, como el que se muestra en el Plano P-05. El Plano P-08 presenta la zonificación geotécnica propuesta para la ciudad de Moquegua, cuyas características en condiciones estáticas y extensión se describen a continuación.

**ZONA I.-** Esta zona está comprendida por la llanura costera y parte del valle del río Tumulaca, abarcando el Cercado de Moquegua, parte del Asentamiento Humano El Siglo y las urbanizaciones que se encuentran en los alrededores. Geológicamente, la parte alta de esta zona está constituida por areniscas arcósicas y lutáceas, y arcillas de color marrón claro con estratigrafías casi horizontales y continuas, pertenecientes a la formación Moquegua Inferior, y la parte baja, que está enclavada en el valle del río Tumulaca, es de origen fluvio-aluvial. Esta zona abarca también la parte baja de la ciudad, aledaña al río y la terraza del aeropuerto, así como el Centro Poblado Menor de los Angeles.

Esta zona presenta las mejores características geotécnicas de todo el área en estudio. El estrato superficial está conformado por un material de relleno, constituido predominantemente por gravas con matriz areno limosa, consolidadas con el tiempo de vida de la ciudad. El estrato subyacente está conformado por el suelo natural, constituido por gravas con matriz arenosa, de color marrón a beige, de compacidad medio suelta en algunas zonas a densa y cementada en otras. Las partículas de grava tienen formas subredondeadas y aplanadas en la zona alta, y redondeadas en la parte baja. En la zona del CPM Los Angeles, a la profundidad de 2.10 m se han encontrado costras de gravas con matriz arenosa cementada, de alta rigidez, como una losas de concreto de baja resistencia, con espesores del orden de 15 cm. Con este material se realizó un ensayo de colapso para determinar su comportamiento bajo la acción del agua, encontrándose que no se disgrega ni sufre asentamientos de importancia al ser saturado.

En las zonas de mayor pendiente existen afloramientos de arenas arcillosas, limos y arcillas limosas, que se encuentran en estado muy denso y con baja humedad, en los cuales se ha determinado que el potencial de expansión es leve y que existen concentraciones de cloruros y sulfatos que pueden generar ataques leves a moderados al concreto de la cimentación.

El análisis de la resistencia del terreno con fines de cimentación de edificaciones de interés social convencionales muestra que la capacidad de carga admisible a una profundidad de cimentación promedio de 1.00 m, varía entre 1.20 y 2.00 kg/cm<sup>2</sup>, dependiendo del contenido de material fino en el estrato portante. El caso más desfavorable se presenta cuando el estrato portante está constituido por

gravas limosas y arenas limosas con gravas, por el contrario, el mayor valor se obtiene para las gravas francas con pocos finos, de origen fluvio-aluvial predominantemente.

**ZONA II.-** Esta zona abarca el área denominada “Pampa de Chen Chen”, la cual ha sido seleccionada como la nueva área de expansión urbana y cuya habilitación urbana se está desarrollando rápidamente para la reubicación de los damnificados del terremoto del 23 de Junio del 2001. Geológicamente esta pampa, ubicada al Sur Este de la ciudad, está conformada por materiales residuales y aluviales del Cuaternario reciente, constituidos por estratos de gravas con matriz arenosa y limosa, así como depósitos tufáceos de la formación Moquegua Superior.

Esta zona se describe como un área de deposición en forma de plano inclinado, con pendientes de 3° a 7°, cuyo perfil estratigráfico es bastante homogéneo y está conformado por estratos de cantos y gravas de matriz arenosa y limosa. Estos materiales tienen una compacidad de suelta a media densa, y se encuentran intercalados por lentes de arena con cierto grado de cementación. En algunas zonas se observa en forma esporádica la presencia de tufos volcánicos con apariencia de poseer características colapsables. Debido a la escasez de humedad y al intemperismo del suelo, se presenta una cobertura superficial con un espesor promedio 0.30 m de material muy fino o polvo muerto.

Para determinar la resistencia portante del terreno de fundación y verificar si presenta características colapsables se realizaron ensayos de carga directa in situ con saturación del suelo. Los resultados de estos ensayos muestran que en esta zona el potencial de colapso del suelo es pequeño, presentando ligeros asentamientos bajo la acción de cargas de hasta 10 kg/cm<sup>2</sup>. La capacidad de carga admisible para cimentaciones superficiales típicas para vivienda con fines sociales, con profundidades de cimentación no menores a 1.00 m, varía de 1.20 a 1.70 kg/cm<sup>2</sup>.

Dado que la topografía de esta zona es algo accidentada por las diversas quebradas que intersecan la pampa, se ha observado que durante los trabajos de habilitación urbana se están realizando trabajos de nivelación del terreno, rellenando las hondonadas sin ninguna conformación del material. Estas zonas de relleno son muy inestables y no son recomendables para la cimentación de edificaciones convencionales. De considerarse la construcción de edificaciones sobre estos materiales, deberá hacerse una conformación de los rellenos o en todo caso la cimentación deberá ser desplantada en terreno natural.

**ZONA III.-** Esta zona está conformada por áreas de terreno menos competentes para cimentaciones convencionales, ya sea por sus características físicas y mecánicas o por presentar un comportamiento especial, particularmente en este caso por poseer características expansivas. Estos tipos de suelos se encuentran predominantemente en dos sectores de la ciudad, uno de ellos es el Centro Poblado Menor de San Antonio, y el otro abarca la zona del cerro El Siglo y el AA.HH. Mariscal Nieto. Para poder diferenciar mejor los dos tipos de comportamiento del suelo, se a dividido esta zona en dos subzonas, denominadas Zona III A y B (Plano P - 08).

**Zona III-A:** Esta zona está conformada por parte de la ladera del cerro El Siglo, el AA. HH. Mariscal Nieto y la zona central del CPM San Antonio. En general el terreno de fundación en esta zona está constituido por material granular, predominantemente grava limosa y arenas arcillosas, de compacidad media a suelta y baja humedad. Las partículas de grava son de formas alargada y subredondeadas, con bloques de TM 14" y espesores que varían desde 1.10 m a más de 4.00 m. Subyaciendo a este material se presentan estratos alternados de arcillas limosas, arenas limosas y arenas arcillosas de baja plasticidad y baja humedad. Estos materiales que presentan un potencial de expansión bajo en la zona del cerro El Siglo y el AA. HH. Mariscal Nieto y moderado a alto en el CPM San Antonio. Los suelos arenosos presentan un potencial de colapso leve en contacto con el agua bajo una presión normal de 2.00 kg/cm<sup>2</sup>.

Las sales solubles y cloruros presentes en el suelo se encuentran con concentraciones bajas, y los sulfatos alcanzan concentraciones que en algunos casos puede generar ataques leves a moderados al concreto de la cimentación.

La capacidad de carga admisible para viviendas de interés social varía de 1.0 a 1.5 kg/cm<sup>2</sup> a una profundidad de cimentación de 1.00 m, sin embargo, en esta zona es necesario considerar los efectos de la expansión del suelo en este tipo de estructuras. En el sector de San Antonio se requiere de un diseño especial de la cimentación para evitar los daños que puede generar el cambio volumétrico del suelo. En el sector de El siglo y el Asentamiento Humano Mariscal Nieto, el elemento más desfavorable lo representa la quebrada del cementerio, que ha generado taludes de fuertes pendientes, cuya inclinación varía entre 15° a mayores de 70°. En este sector también se encuentra el material arcilloso de la formación Moquegua Inferior, aunque las evidencias de problemas por expansión de suelos son menores.

**Zona III-B:** Es la zona periférica del CPM San Antonio, conformado principalmente por las áreas próximas a las laderas de los cerros, donde se presentan afloraciones del material arcilloso denominado moro moro, de la formación Moquegua Inferior.

El perfil estratigráfico de esta zona presenta estratos alternados de arcillas limosas, arenas arcillosas y arenas limosas de baja a mediana plasticidad, muy rígidas y de baja humedad. Superficialmente este material se encuentra cubierto por un estrato de grava limosa de hasta 1.0 m de espesor en promedio. La arcilla limosa, que constituye el terreno de fundación para las edificaciones construidas en esta zona, presenta un grado de expansión moderado a alto en contacto con el agua, representando un serio problema para las viviendas de interés social. En el estudio realizado en el Centro de Salud de San Antonio, cimentado sobre este material, se ha encontrado que el potencial de expansión libre de la arcilla limosa alcanza el 18%, generando presiones de hinchamiento mayores de 4.6 kg/cm<sup>2</sup>. Este comportamiento del suelo ha dañado seriamente a dicha estructura, a tal punto que ha sido declarada inhabitable.

Los ensayos de carga directa in situ con saturación del suelo realizados en este lugar, muestran que el comportamiento del material arcilloso es complejo, sufriendo asentamientos moderados al entrar en contacto con el agua y luego ocasionando expansiones por absorción de agua con el transcurso del tiempo. Para poder garantizar un adecuado comportamiento de las estructuras bajo estos efectos se requiere diseñar una cimentación especial, cuyo costo lo hace inaccesible para ser utilizadas en viviendas de interés social.

La capacidad admisible para viviendas de interés social varía de 0.8 a 1.0 kg/cm<sup>2</sup> en condiciones saturadas. El problema de expansión de suelos es más notorio en las edificaciones existentes en esta zona, debido a que éstas están cimentadas directamente sobre el material expansivo.

**ZONA IV.** Esta zona está conformada básicamente por el CPM San Francisco, ubicado sobre las laderas del cerro que se encuentra al Este de El Cercado de Moquegua. La parte alta de esta zona está conformada superficialmente por rellenos y gravas de color beige pertenecientes a la formación Moquegua Superior, compuesta por gravas angulosas, arenas medias a finas y limos inorgánicos, de compacidad suelta y potencias mayores a los 4.00 m explorados. La topografía accidentada constituye el elemento más desfavorable de este sector,



presentando pendientes mayores a los 70°, lo cual genera también amplificaciones sísmicas importantes. Las cimentaciones de las edificaciones se encuentran generalmente en áreas de cortes y rellenos realizados para nivelar el terreno, por lo cual son altamente vulnerables ante los efectos sísmicos, tal como ha sido demostrado durante el terremoto de Junio del 2001. En consecuencia, esta zona no es recomendable para ser urbanizada.

La parte baja de esta zona presenta un estrato de relleno de mayor potencia, por debajo del cual se encuentran estratos de arcillas limosas y arenas arcillosas en forma alterna, pertenecientes a la formación Moquegua Inferior. La capacidad de carga admisible para viviendas de interés social varía de 0.6 a 0.8 Kg/cm<sup>2</sup> en terreno saturado. Las características de estos suelos son similares a los descritos en la Zona III B, presentando también los problemas de expansión mencionados. En consecuencia, estos suelos no son adecuados para la cimentación de edificaciones convencionales de interés social, pues se requiere realizar una cimentación especial para soportar las presiones de hinchamiento y los cambios volumétricos que puede sufrir el terreno de fundación por cambios de humedad. Las estructuras convencionales están propensas a sufrir agrietamientos y daños que pueden llegar a comprometer su estabilidad por efecto de la expansión del suelo, tal como se observa en la actualidad.

### **6.3 Características Dinámicas de los Suelos de Fundación**

El análisis del comportamiento dinámico de los suelos de fundación de la ciudad de Moquegua ha sido realizado mediante ensayos de medición de microtrepidaciones. Estos ensayos han permitido determinar los períodos predominantes de vibración natural del terreno en todo el área de estudio, con los cuales se ha elaborado un mapa de curvas isoperiodos para la ciudad de Moquegua (Plano P-07). La evaluación de dicha información, conjuntamente con el análisis de los registros sísmicos obtenidos durante el terremoto de Junio del 2001, ha permitido definir las características dinámicas del terreno en cada una de las zonas geotécnicas preliminarmente definidas en el acápite anterior, las cuales se describen a continuación:

**Zona I.** Conformada principalmente por El Cercado y el CPM Los Angeles. Esta zona presenta un relleno superficial medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas, que en algunas zonas alcanzan hasta los 2.0 m de profundidad. El terreno natural está conformado por gravas con matriz arenosa y limosa, de compacidad media a suelta, y en zonas por un material fuertemente

cementado de alta rigidez. Los periodos predominantes obtenidos en esta zona varían desde 0.10 s hasta 0.40 s.

Si bien es cierto que los resultados de los ensayos de microtrepidaciones indican que los periodos predominantes son menores de 0.4 s, durante el terremoto del 23 de Junio del 2001 se han obtenidos registros que muestran amplificaciones importantes en un rango de periodos de hasta 0.8 s. En consecuencia, para esta zona se recomienda usar los parámetros de diseño sismo-resistente correspondientes a un Suelo Tipo S2 del Reglamento Nacional de Construcciones (RNC).

**Zona II.** Área destinada a la zona de expansión urbana de Chen Chen. Litológicamente está constituido por conglomerados y areniscas intercaladas con algunos estratos de areniscas tufáceas, así como tufos depositados. En esta zona geotécnica, el terreno presenta dos rangos de periodos predominantes bastante diferentes a pesar que aparentemente no existen discontinuidades geológicas que expliquen tal comportamiento dinámico. En el sector de la planta de tratamiento de agua y vecina a la quebrada del pedregal, los periodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 s, manifestando un comportamiento de suelo rígido, sin embargo, en el sector adyacente, que es el área destinada a la expansión urbana, los periodos predominantes varían de 1.0 hasta 1.5 s mostrando amplificaciones importantes en este rango de periodos.

Debido a que la mayor extensión del terreno destinada para la expansión urbana se encuentra en la zona de periodos predominantes mayores que 1.0 s, para el diseño sismo-resistente de esta zona se recomienda considerar los parámetros correspondientes al Suelo Tipo S3 del RNC.

**Zona III.** Conformada principalmente por el CPM San Antonio, y parte del Asentamiento Humano El Siglo. Esta zona se ha subdividido en dos zonas en función a la profundidad en que se encuentra el estrato de suelo arcilloso, que presenta características expansivas. Los valores de periodos predominantes obtenidos en estas sub-zonas son las siguientes:

**Zona III A.** Conformado por un material granular de compacidad media a suelta, el cual en algunas zonas se encuentra cubierto por estratos de relleno de poca potencia. Subyaciendo al material granular, a profundidades mayores a los 4.0 m en promedio, se encuentra un estrato de arcillas limosas y arenosas, de baja plasticidad. Los periodos predominantes registrados en la zona que abarca el CPM San Antonio varían de 0.5 a 0.8 s en la parte mas llana, disminuyendo hasta 0.2 s en las

partes altas. En la zona de AA.HH Mariscal Nieto y la Quebrada del Pedregal los periodos predominantes varían desde 0.16 s en el sector de topografía accidentada hasta 0.40 s en la zona baja de la quebrada. Los parámetros de diseño sismo-resistente recomendados para esta zona corresponden al Suelo Tipo S3 del RNC.

**Zona III B.** El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y moderado a alto potencial de expansión. Los periodos predominantes determinados en esta zona tienen poca variación, encontrándose en el rango de 0.20 a 0.40 seg. En este sector también se han observado grandes amplificaciones sísmicas (Lermo, 2002), por lo que su comportamiento dinámico puede ser caracterizado como el de un Suelo Tipo S2 del RNC.

**Zona IV.** Conformada por el área donde se ubica el CPM San Francisco y está constituida por areniscas arcólicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro con estratificación casi horizontal, con una topografía bastante accidentada. Los periodos predominantes del terreno en esta zona varían de 0.2 a 0.35 s, sin embargo la conformación topográfica contribuye a la amplificación de las ondas sísmicas, generando un efecto desfavorable para las edificaciones. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sismo-resistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un Suelo Tipo S3 del RNC.

#### **6.4 Zonificación Geotécnica Sísmica de la Ciudad de Moquegua**

En este acápite se presenta en forma integral las características geotécnicas del área urbana de la ciudad de Moquegua, considerando el comportamiento del suelo bajo solicitaciones de cargas en condiciones estáticas y dinámicas. Esta zonificación agrupa áreas que de acuerdo a los distintos factores analizados, presentan un nivel de peligro sísmico tal que su efecto resultante sobre las estructuras es similar; por lo tanto no necesariamente las áreas representadas en una misma zona van a tener el mismo comportamiento en todos los aspectos considerados. La zonificación propuesta se muestra en el Plano P-08, y una descripción de la misma se presenta seguidamente:

**Zona I.-** Esta zona está comprendida por la llanura costera y parte del valle del río Tumilaca, abarcando el Cercado de Moquegua, parte del Asentamiento Humano

El Siglo y las urbanizaciones que se encuentran en los alrededores. Geológicamente, la parte alta de esta zona está constituida por areniscas arcóscas y lutáceas, y arcillas de color marrón claro con estratigrafías casi horizontales y continuas pertenecientes a la formación Moquegua Inferior y la parte baja, que está enclavada en el valle del río Tumulaca, es de origen fluvio-aluvial. Esta zona abarca también la parte baja de la ciudad, aledaña al río y la terraza del aeropuerto, así como el Centro Poblado Menor de los Angeles. El material de fundación donde se desplanta las estructuras existentes, presenta un relleno superficial medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas, que en algunas zonas alcanzan hasta los 2.0 m de profundidad. Subyaciendo a éste se encuentra el terreno natural que está conformado por gravas con matriz arenosa y limosa, de compacidad media a suelta, y en zonas por un material fuertemente cementado de alta rigidez.

La capacidad de carga admisible para una cimentación típica convencional en esta zona varía de 1.2 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, para profundidades de cimentación de 1.00 a 1.20 m. Los periodos predominantes obtenidos para esta zona varían desde 0.10 s hasta 0.40 s, con factores de amplificación importantes hasta un rango de periodos de 0.80 s. En consecuencia, para esta zona se recomienda usar los parámetros de diseño sismo-resistente correspondientes a un Suelo Tipo S2 del Reglamento Nacional de Construcciones.

Esta zona está conformada en su mayor parte por el área consolidada de la ciudad, y en menor proporción por un área de expansión, por lo cual, las estructuras mas vulnerables lo constituyen las edificaciones antiguas, que se encuentran en ésta.

**Zona II .-** Es el área de mayor interés para el presente estudio, por lo que abarca la nueva zona de expansión urbana destinada para la reubicación a los damnificados del sismo del 23 de Junio del 2001. Litológicamente está constituido por material de deposición formado por conglomerados y areniscas intercalados con algunos estratos de areniscas tufáceas así como tufos depositados de la formación Moquegua Superior. Su topografía presenta suaves pendientes de 3° a 7°, conformada por estratos de gravas con matriz limosa y arenosa, de compacidad suelta a media. Para fines de cimentación de viviendas de interés social, la capacidad de carga admisible a la profundidad de cimentación de 1.00 m, sobre el terreno natural, varía de 1.2 a 1.7 Kg/cm<sup>2</sup>.

En esta zona geotécnica, el terreno presenta dos rangos de periodos predominantes bastante diferentes a pesar que aparentemente no existen discontinuidades geológicas que expliquen tal comportamiento dinámico. En el

sector de la planta de tratamiento de agua y vecina a la quebrada del Pedregal, los periodos predominantes varían entre 0.1 y 0.3 s, manifestando un comportamiento de suelo rígido, sin embargo, en el sector adyacente, que es el área destinada a la expansión urbana, los periodos predominantes varían de 1.0 hasta 1.5 s mostrando amplificaciones importantes en este rango de periodos. Debido a que la mayor extensión del terreno destinada para la expansión urbana se encuentra en la zona de periodos predominantes mayores que 1.0 s, para el diseño sismo-resistente de esta zona se recomienda considerar los parámetros correspondientes al Suelo Tipo S3 del RNC.

**Zona III** .- Conformada principalmente por el CPM San Antonio, parte de los Asentamientos Humanos El Siglo y Mariscal Nieto así como parte de la Quebrada del Pedregal. Para poder diferenciar mejor los dos tipos de comportamiento del suelo, se a dividido esta zona en dos subzonas, denominadas Zona III A y B

**Zona III A.** Conformada por parte de la zona llana del área central del CPM San Antonio, así como por la zona mas elevada del cerro El Siglo y los asentamientos humanos El siglo y Mariscal Nieto, terminando en la Quebrada del Pedregal. El terreno de fundación está conformado por un material granular de compacidad media a suelta, el cual en algunas zonas se encuentra cubierto por estratos de relleno de poca potencia. Subyaciendo al material granular, a profundidades mayores a los 4.0 m en promedio, se encuentra un estrato de arcillas limosas y arenosas. La capacidad de carga admisible para edificaciones de interés social varía de 1.0 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> a una profundidad de cimentación de 1.00 m. Los periodos predominantes registrados en la zona que abarca el CPM San Antonio varían de 0.5 a 0.8 s en la parte mas llana, disminuyendo hasta 0.2 s en las partes altas. En la zona de AA.HH Mariscal Nieto y la Quebrada del Pedregal los periodos predominantes varían desde 0.16 s en el sector de topografía accidentada hasta 0.40 s en la zona baja de la quebrada. Los parámetros de diseño sismo-resistente recomendados para esta zona corresponden al Suelo Tipo S3 del RNC. Para efecto de diseño de cimentaciones en estos tipos de suelos se debe considerar la posibilidad de asentamientos diferenciales por un leve potencial de colapso del material granular cementado, así como pequeños levantamientos por expansión de las arcillas limosas. de baja plasticidad.

**Zona III B** Esta zona abarca las dos partes laterales del CPM San Antonio, donde existen afloramientos de la Formación Moquegua Inferior, conformado por depósitos de areniscas arcósicas lutáceas y arcillosos de color marrón claro, con estratificación casi horizontal y continua. El terreno

de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión (hasta 18% de expansión con cargas de expansión de  $4.6 \text{ Kg/cm}^2$  ), por lo que se debe considerar su efecto en las cimentaciones para evitar el agrietamiento de las edificaciones. La capacidad de carga admisible del terreno en condiciones saturadas varía de 0.8 a  $1.0 \text{ Kg/cm}^2$  para edificaciones de interés social, con profundidades de cimentación de 1.0 m.

Los periodos predominantes determinados en esta zona tienen poca variación, encontrándose en el rango de 0.20 a 0.40 s. Sin embargo, en este sector también se han observado grandes amplificaciones sísmicas (Lermo, 2002), por lo que su comportamiento dinámico debe ser caracterizado como el de un Suelo Tipo S2 del RNC.

**Zona IV** Esta zona está conformada básicamente por el CPM San Francisco, ubicado sobre las laderas del cerro que se encuentra al Este de El Cercado de Moquegua. El terreno de fundación está constituido superficialmente por rellenos y gravas de color beige pertenecientes a la formación Moquegua Superior, compuesta por gravas angulosas, arenas medias a finas y limos inorgánicos, de compacidad suelta con potencias mayores a los 4.00 m explorados. Subyaciendo a este material se encuentran areniscas arcóscicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro, rígida, con estratificación casi horizontal. La topografía de esta zona es bastante accidentada presentando pendientes mayores a los  $70^\circ$ , lo cual es un elemento desfavorable para su uso como área urbana. La capacidad de carga admisible para viviendas de interés social varía de 0.6 a  $0.8 \text{ Kg/cm}^2$  en terreno saturado.

Los periodos predominantes del terreno en esta zona varían de 0.2 a 0.35 s, sin embargo esta zona es propensa a sufrir grandes amplificaciones sísmicas por efectos topográficos y posibles problemas de inestabilidad de taludes. En consecuencia, esta zona presenta las condiciones mas desfavorables para ser utilizada como área urbana. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sismo-resistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un Suelo Tipo S3 del RNC.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

La presente disertación busca contribuir con respuestas técnicas a las amenazas de los fenómenos naturales con los cuales convive el poblador, de manera que se pueda mitigar sus efectos. Las conclusiones que se derivan de la evaluación e interpretación de los resultados, documentados en los capítulos precedentes, se reportan a continuación:

1. Las unidades geomorfológicas de área de estudio están constituidas por depósitos clásticos del Terciario superior pertenecientes a la Formación Moquegua y a depósitos del cuaternario, los cuales están disectados por numerosas quebradas que confluyen en el valle de los ríos Tumulaca, Torata y Huanrancane. La ciudad de Moquegua se ubica sobre el lecho del río Tumulaca y los flancos del valle que transcurre de Noreste a Suroeste. La otra parte del territorio es árida, y está compuesta por colinas y penillanura costera, en la cual se ubican los poblados de San Antonio, Chen Chen, Samegua y Los Ángeles.
2. La geología local del área de estudio muestra que la ciudad de Moquegua se encuentra asentada predominantemente sobre dos unidades geológicas, constituidas por las formaciones Moquegua Superior y Moquegua Inferior. La primera cubre la mayor parte del área de estudio y está constituida superficialmente por un suelo residual, de un espesor de 5 a 15 m aproximadamente, compuesto por gravas y arenas de compacidad suelta a media y en sectores compactos y cementados. La Formación Moquegua Inferior está conformada por lutitas, areniscas arcósicas, limolitas y arcillas cementadas de color marrón y marrón claro, altamente compactas. Existen además depósitos cuaternarios recientes, los cuales se dividen en depósitos residuales y transportados, estos últimos conformados por suelos coluviales, aluviales y fluviales.
3. La geodinámica de la zona de estudio muestra evidencias de erosiones generadas por las diversas quebradas secas y de movimientos de masas de suelos en el cerro El Siglo. Los peligros geodinámicos latentes son los deslizamientos, desprendimientos y caídas de rocas en los taludes de corte de las vías que comunican El Cercado con San Antonio, la carretera binacional y las zonas de fuerte pendiente, los cuales pueden ser activados por los movimientos sísmicos que ocurren en esta zona. Así mismo, en la mayoría de las quebradas y valles secos existen evidencias de ocurrencia de huaycos, especialmente en la quebrada El Pedregal, que pueden reactivarse en épocas de lluvias extraordinarias.

4. La historia sísmica de la región sur occidental del Perú indica que la ciudad de Moquegua se encuentra en una zona de alta actividad sísmica, habiéndose registrado una serie de eventos de gran intensidad que han afectado considerablemente a esta ciudad. El análisis de peligro sísmico indica que en la ciudad de Moquegua pueden ocurrir eventos con mayores niveles de sacudimiento que el último evento ocurrido el 23 de Junio del 2001; en consecuencia, es de suma importancia que en las acciones de reconstrucción se considere esta amenaza natural en el diseño de las edificaciones.
5. El análisis de peligro sísmico probabilístico muestra que, para un tiempo de exposición sísmica de 50 años y un nivel de confianza del 90%, la ciudad de Moquegua está expuesta a la ocurrencia de un evento sísmico que genere aceleraciones máximas de 0.41 g, y para 100 años de exposición sísmica las aceleraciones máximas esperadas son de 0.51 g.
6. El programa de exploración geotécnica ha consistido en la ejecución de calicatas, ensayos estándar y especiales de laboratorio, ensayos de carga directa in situ y ensayos geofísicos de refracción sísmica y medición de microtrepidaciones. La evaluación de toda esta información ha permitido definir cuatro zonas geotécnicas en la ciudad de Moquegua, de acuerdo a las características físico mecánicas y dinámicas de los suelos de fundación.
7. La Zona I está conformada por la parte consolidada de la ciudad. Superficialmente presenta un material de relleno medianamente compacto, constituido por arenas y gravas limosas, que en algunas zonas alcanzan hasta los 2.0 m de profundidad. El terreno natural está conformado por gravas con matriz arenosa y limosa, de compacidad medio suelta a densa. La capacidad de carga admisible del terreno de fundación para cimentaciones típicas varía de 1.2 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>, para profundidades de cimentación de 1.00 a 1.20 m. Los periodos predominantes obtenidos para esta zona varían desde 0.10 hasta 0.40 s. Debido a las características de amplificación sísmica observados en los registros sísmicos obtenidos en esta zona, para el diseño sismo-resistente se recomienda considerar los parámetros sísmicos correspondientes a un Suelo Tipo S2 del RNC.
8. La Zona II, que abarca las Pampas de Chen Chen, es un área de deposición en forma de plano inclinado, con pendientes de 3° a 7°, conformada por estratos de gravas con matriz limosa y arenosa, de compacidad suelta a media. En ciertas zonas se presentan intercalaciones de tufos volcánicos. La capacidad de carga admisible para cimentaciones superficiales típicas a la profundidad de cimentación de 1.0 m, sobre terreno natural, varía de 1.2 a 1.7 kg/cm<sup>2</sup>. Es recomendable no cimentar en el material de relleno generado durante la nivelación del terreno, a menos que éste haya sido convenientemente conformado.

En el sector destinado para la expansión urbana, los periodos predominantes varían de 1.0 hasta 1.5 s, mostrando fuertes amplificaciones en este rango de periodos, por lo tanto, para el diseño sismo-resistente en esta zona se



recomienda considerar los parámetros correspondientes al Suelo Tipo S3 del RNC.

9. La Zona III ha sido subdivididas en dos subzonas con las siguientes características:

Zona III A, Conformada por el sector llano del área central del CPM San Antonio, así como por la zona mas elevada del cerro El Siglo y los asentamientos humanos El siglo y Mariscal Nieto, terminando en la Quebrada del Pedregal. El terreno de fundación está conformado por un material granular de compacidad media a suelta. La capacidad de carga admisible para edificaciones de interés social varía de 1.0 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup> a una profundidad de cimentación de 1.00 m. Los periodos predominantes registrados en la zona que abarca el CPM San Antonio varían de 0.5 a 0.8 s, disminuyendo hasta 0.2 s en las partes altas. En la zona de AA.HH Mariscal Nieto y la Quebrada del Pedregal los periodos predominantes varían desde 0.16 s hasta 0.40 s en la zona baja de la quebrada. Los parámetros de diseño sismo-resistente recomendados para esta zona corresponden al Suelo Tipo S3 del RNC. Para efecto de diseño de cimentaciones en estos tipos de suelos se debe considerar la posibilidad de asentamientos diferenciales por un leve potencial de colapso del material granular cementado, así como pequeños levantamientos por expansión de las arcillas limosas. de baja plasticidad.

Zona III B, Esta zona abarca las dos partes laterales del CPM San Antonio, donde existen afloramientos de la Formación Moquegua Inferior. El terreno de fundación está conformado por estratos de arcilla limosa y arena arcillosa, cubiertos por un material gravoso de 1.0 m de espesor en promedio. El material arcilloso tiene una consistencia rígida, bajo contenido de humedad y alto potencial de expansión, por lo que se debe considerar su efecto en las cimentaciones para evitar el agrietamiento de las edificaciones. La capacidad de carga admisible del terreno en condiciones saturadas varía de 0.8 a 1.0 Kg/cm<sup>2</sup> para edificaciones de interés social, con profundidades de cimentación de 1.0 m.

Los periodos predominantes determinados en esta zona tienen poca variación, encontrándose en el rango de 0.20 a 0.40 s. Sin embargo, en este sector también se han observado grandes amplificaciones sísmicas (Lermo, 2002), por lo que su comportamiento dinámico debe ser caracterizado como el de un Suelo Tipo S2 del RNC..

10. La Zona IV: Predominantemente abarca el área donde se ha situado el CPM San Francisco. El terreno de fundación está constituido superficialmente por rellenos y gravas angulosas, arenas medias a finas y limos inorgánicos, de compacidad suelta con potencias mayores a los 4.00 m explorados. Subyaciendo a este material se encuentran areniscas arcóscicas, lutáceas y arcillosos de color marrón claro, rígida, con estratificación casi horizontal, que poseen características expansivas. La topografía de esta zona es bastante accidentada presentando pendientes mayores a los 70°, lo cual es un elemento desfavorable para su uso como área urbana. La capacidad de carga

admisible para viviendas de interés social varía de 0.6 a 0.8 Kg/cm<sup>2</sup> en terreno saturado. Los periodos predominantes del terreno varían de 0.2 a 0.35 s, sin embargo esta zona es propensa a sufrir grandes amplificaciones sísmicas por efectos topográficos y posibles problemas de inestabilidad de taludes. En consecuencia, esta zona presenta las condiciones más desfavorables para ser utilizada como área urbana. En caso de proyectarse la construcción de edificaciones en esta zona, para el diseño sísmo-resistente se deberá considerar el comportamiento dinámico del terreno similar al de un Suelo Tipo S3 del RNC.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- 1 Las zonas geotécnicas presentadas en este estudio representan la caracterización del terreno de fundación del área urbana de la ciudad de Moquegua. En consecuencia, su utilización está orientada a la planificación urbana y la construcción de viviendas de interés social. Para la construcción de edificaciones de mayor importancia se recomienda hacer un estudio de suelos específico, para garantizar la seguridad de la estructura.
- 2 Las cuatro zonas identificadas representan no sólo el comportamiento del terreno bajo la acción de cargas transmitidas por las estructuras, sino que además representan el grado de peligro al que éstas están expuestas ante la ocurrencia de fenómenos naturales. Por lo tanto, se recomienda tomar en cuenta estas características para orientar el crecimiento de la ciudad y reglamentar los tipos de estructuras que se pueden construir en las áreas apropiadas de las zonas de mayor peligro.
- 3 En las zonas donde se presentan los suelos con características expansivas (Zona III predominantemente), se requiere diseñar una cimentación que transmita una carga lo suficientemente elevada para controlar en parte la carga de expansión pero cuidando de no sobrepasar la resistencia cortante del terreno. Además la estructura deberá ser lo suficientemente flexible para soportar ciertas deformaciones sin sufrir daños de consideración. Se recomienda orientar a la población sobre el comportamiento de este tipo de suelo y las consideraciones que deben tener para la construcción de sus viviendas
- 4 Si bien es cierto que el mayor peligro al que está expuesta la ciudad de Moquegua es la ocurrencia de eventos sísmicos, no se debe descartar la posibilidad de precipitaciones pluviales extraordinarias que también pueden generar grandes desastres en las áreas de las torrenteras y quebradas secas que han sido pobladas. Se recomienda prohibir y controlar el asentamiento en estas áreas.
- 5 En las labores de reconstrucción que se están llevando a cabo, se recomienda a las autoridades orientar a la población y supervisar las construcciones a fin de disminuir su vulnerabilidad ante la ocurrencia de eventos sísmicos futuros.

## REFERENCIAS

1. Aki K. (1957), "Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves with Special Reference to Microtremors". Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 36, pp. 15-456, University of Tokyo, Tokyo.
2. Alva Hurtado J., O. Chávez y W. Taniwangsa (1986), "Estudio de Microtrepidaciones en Chimbote y Huaraz". Revista TECNIA, Vol. 3, N°1, pp. 61-74. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
3. Alva Hurtado J.E., J. Meneses y V. Guzmán (1984), "Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú", V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, Perú.
4. Allam A. (1969), "An investigation into the Nature of Microtremors Through Experimental Studies of Seismic Waves". Doctoral Thesis of Tokyo University, Tokyo.
5. Allam A. y E. Shima (1.967), "An Investigation into the Nature of Microtremors". Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 45, pp. 43-59, University of Tokyo, Tokyo, Japón.
6. Bellido Bravo E. (1979). Geología del Cuadrángulo de Moquegua, Hoja: 35 – u. Boletín N° 15 ,INGEMMET, Lima-Perú.
7. 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.
8. Berrocal J., (1974), "South American Seismotectonics from SAAS data", Thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in the University of Edinburg.
9. Berrocal J., Deza E. y Shikiya J. (1975), "Estudio de Sismicidad para el Proyecto de Derivación del Río Mantaro a Lima", Informe del Instituto Geofísico del Perú a ELECTROPERU S.A.
10. Boroscheck, R., D. Comte y A. Morales (2002), "Características del Terremoto de Ocoña del 23 de Junio del 2001", VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago de Chile.

11. Brune J. y Oliver (1959), "The seismic noise of the earth's surface". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 49, N°4, pp. 349-353.
12. Cabello, M. C. (2000). Zonificación Geotécnica Preliminar de la Ciudad de Moquegua. Tesis, Universidad Privada de Moquegua, Moquegua.
13. Casaverde L. y Vargas J. (1980), "Zonificación Sísmica del Perú", II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente, Organización de Estados Americanos y Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
14. Castillo J. (1993), "Peligro Sísmico en el Perú", Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería Lima.
15. Cornell A. (1968), "Engineering Seismic Risk Analysis", Bulletin of the Seismological Society of America", Vol 58, N°5 págs. 1538-1606.
16. Das, B. M., (2001). Principios de Ingeniería de Cimentaciones. Cuarta Edición, International Thomson Editores.
17. Deza E. y C. Carbonell (1978), "Regionalización Sismotectónica Preliminar del Perú", IV Congreso Peruano de Geología, Lima, Perú.
18. Deza E. (1969), "Estudio Preliminar Sobre las Zonas de Transición que Separan Posibles Regiones Sismotectónicas del Margen Occidental de Sudamérica: Zona de Transición en el Perú", I Congreso Nacional de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Lima, Perú.
19. Fernandez E. (1998). Investigación del Conglomerado Colapsable de La Cano, Vitor-Arequipa. U.N.I. Ing. Civil, Post Grado.
20. Huamán C. (1991), "Microzonificación Sísmica de La Punta y el Callao". Tesis de Grado. I Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. I
21. Idriss I. (1985), "Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice". XI International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, USA, Vol I.
22. Instituto Geofísico del Perú. (2001), "Catálogo Sísmico del Perú: Versión Revisada y Actualizada". Lima, Perú.

23. Isacks B., Oliver J. y Sykes L.R., (1968), "Seismology and Global Tectonics", *Journal of Geophysical Research*, Vol 73, N°18, págs. 5855-5899. Martínez, A. (1997) "Licuación de Suelos Gravesos", XI CONIC, Trujillo.
24. Kanai K. (1957), "The Requisite Conditions for the Predominant Vibration of Ground". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 235, pp. 457-470, University of Tokyo, Tokyo.
25. Kanai K. (1962), "On the Predominant Period of Earthquake Motions". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 40, pp. 855-860. University of Tokyo, Tokyo.
26. Kanai K. y T. Morishita (1963), "Relation Between Earthquake Damage and Nature of Ground - 11". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 41, pp. 271-277, University of Tokyo, Tokyo.
27. Kanai K y T. Tanaka (1961), "On Microtremors VIII". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 39, pp. 97-114, University of Tokyo, Tokyo.
28. Kanai K, T. Tanaka y K. Osada (1954), "Measurement of Microtremors". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 32, pp. 199-209, University of Tokyo, Tokyo.
29. Kanai K., T. Tanaka, K. Osada, T. Suzuki, T. Morishita y S. Yoshizawa (1966), "On Microtremors - X". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol. 43, pp. 577-588, University of Tokyo, Tokyo.
30. Kobayashi H., K. Seo y S. Midorikawa (1986), "Estimated Strong-Ground Motions in the Mexico City due to the Michoacan, Mexico Earthquake of September 19, 1985 Based on Characteristics of Microtremor". Report on Seismic Microzoning Studies of the Mexico Earthquake of September 19, 1985. Part 2. The Graduate School at Nagatsuta. Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan.
31. Kosaka, R., H. Arias, E. Farfán, E. Gonzales, A. Minaya y J. Ticona, (2001), "Evaluación de Peligros de la Ciudad de Moquegua", Informe Convenio UNAS – INDECI, Proyecto PER 98/018 PNUD – INDECI.
32. Lermo J. y F. J. Chavez-García (1994), "Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?". *BSSA*. Vol. 84, pp1350-1364.
33. Lermo J., M. Rodríguez y S. Singh (1988), "Observaciones de Microtemblores y su Aplicación en la Ingeniería Sísmica". *Revista GEOFISICA*, N°28, pp. 123-143, Enero- Junio 1988. Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
34. Lermo, J., F. Lázares y J. Cuenca, (2002), "El Terremoto de Arequipa, Perú del 23 de Junio del 2001 (Mw 8.2), Efectos de Sitio en las Ciudades de Arequipa, Camaná,

Moquegua, Ilo y Tacna, y su Relación con los Daños en las Edificaciones”, VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago de Chile.

35. McGuire R. K. (1974), "Seismic Structural Response Risk Analysis incorporating Peak Response Regression on Earthquake Magnitude and Distance", MIT Report R74-51 Cambridge MA, USA.
36. McGuire R. K. (1976), "Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis", Open-File Report 76-67, U.S. Geological Survey.
37. Omori F. (1908), "On Microtremors". Rep. Imp. Earthq. Inv. Comm., Vol. 2, pp. 1-6.
38. Pomachagua, O. (2000), "Características Generales de la Tectónica y Sismicidad de Perú", Revista de Trabajos de Investigación, CNDG, IGP, pp. 93 – 104. Lima, Perú.
39. Richter C. F. (1958), "Elementary Seismology", W.H. Freeman Co., San Francisco.  
Sebrier M., D. Huamán, J. L. Blanc, J. Macharé, D. Bonnot y J. Cabrera (1982), "Observaciones acerca de la Neotectónica del Perú", Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú.
40. Rivera H. (2001 ). "eología General". Lima – Perú
41. Ruiz M. y S. Gonzales (2001 ). "Geología Aplicada a la Ingeniería Civil". LIMUSA, México.
42. 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 Anrisísmica, pp. 33-44.
43. 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.
44. Silgado E. (1992), "Investigación de Sismicidad Histórica en la América del Sur en los Siglos XVI, XVII, XVIII y XIX", CONCYTEC, Lima, Perú.
45. SISRA (1985), "Catálogo de Terremotos para América del Sur" Vol 7a, 7b y 7c, Proyecto SISRA, CERESIS, Lima, Perú.
46. Slemmons D. (1982), " Magnitude of Active Faults", U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, USA.

47. Taniwangsa W. (1981), "A Microzonation of Jakarta City". Research Report 81-01. Department of Architecture, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo.
48. Tavera, H., y E. Buforn. (1998), " Sismicidad y Sismotectónica de Perú", Física de la Tierra, N° 10, pp. 187 – 219. España.
49. Tokeshi J. (1990), "Microtrepidaciones en las ciudades de Tacna y Cusco". Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
50. TC-4, J.S.S.M.F.E. (1993) "Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards", Technical Committee of Earthquake Geotechnical Engineering, Japan.
51. Vizcarra, M. A. (1986) Microzonificación Sísmica de Moquegua Aplicada al Planeamiento Urbano para la Mitigación de Desastres Naturales Empleando el Método Simplificado. Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
52. Yamahara H. (1969), "The Inter-Relation Between the Frequency Characteristics of Ground and the Earthquake Damage of Structures". The Research Laboratory of Shimuzu Construction Co., Private Series N°1, Tokyo.
53. Zavala Carrión B., Nuñez Juarez S. (1999). Estudio Geológico – Geotécnico de la Región Sur – Occidental del Perú. Boletín N°22, INGEMMET, Lima-Perú