

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL**



## **ESTUDIOS DE INGENIERIA ANTISISMICA EN CHUQUIBAMBA Y PAMPACOLCA ( AREQUIPA )**

**SISMO DEL 16 - 02 - 79**

### **T E S I S**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**CESAR AUGUSTO RODRIGUEZ BUENDIA**

**Lima - Perú  
1982**

### **AGRADECIMIENTO**

El autor agradece al Ing. Julio Kuroiwa H., Profesor del Departamento Académico de Estructuras y Construcción de la Universidad - Nacional de Ingeniería por su guía y asistencia a través de la preparación de este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a las siguientes personas e Instituciones cuya ayuda hace posible la culminación de la presente tesis.

- Ings. Antonio Mendoza, Percy Gonzáles, Mauro Marquina y Arqto. Wilfredo Andradé de la Dirección General de Vivienda y Construcción de ORDEAREQUIPA.
- Al Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Regional Arequipa, a la Compañía Constructora Julio Alva Centurión y a la Universidad Nacional de Ingeniería por las facilidades brindadas en el uso de sus Laboratorios de suelos.
- A mis compañeros de grupo.
- Al Sr. Leandro Rodríguez V. del Instituto Geofísico del Perú.
- A la Srta. Nancy Peñaranda C.

## I N D I C E

	PAG.
<u>CAPITULO I:</u> INTRODUCCION	1
<u>CAPITULO II:</u> ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	
2.1 UBICACION GEOGRAFICA Y ACCESO	4
2.2 CLIMA Y VEGETACION	5
2.3 POBLACION Y NIVEL SOCIO-ECONOMICO	6
<u>CAPITULO III:</u> ASPECTOS SISMOLOGICOS	
3.1 CARACTERISTICAS SISMOLOGICAS DE LA REGION	8
3.2 HISTORIAL SISMICO	10
3.3 EL SISMO DEL 16 DE FEBRERO DE 1979	13
3.3.1 Réplicas	14
3.3.2 Intensidades	14
<u>CAPITULO IV:</u> SISMICIDAD	
4.1 NOTA INTRODUCTORIA	17
4.2 LA FUNCION DE DISTRIBUCION DE VALORES EXTREMOS Y SU MODIFICACION	18
4.2.1 Determinación de la Función de Valores Extremos para Terremotos	
4.2.2 Estimación del Peligro Sísmico en un Futuro Cercano.	22
4.2.3 Modificación de la Función de Distribución de Valores Extremos	24
4.3 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DE ESTUDIO	26
4.4 CONCLUSIONES	32
<u>CAPITULO V:</u> CONDICIONES LOCALES EN CHUQUIBAMBA	

5.1	TOPOGRAFIA	34
5.2	GEOMORFOLOGIA DE CHUQUIBAMBA	35
5.2.1	Influencia del material rocoso en el moldeado	36
5.2.2	Influencia de otros factores en el moldeado	37
5.3	LAS TERRAZAS DE CHUQUIBAMBA	39
5.4	MORFOGENESIS DE CHUQUIBAMBA	39
5.5	GEOLOGIA LOCAL	39

#### CAPITULO VI: CONDICIONES LOCALES EN PAMPACOLCA

6.1	TOPOGRAFIA	42
6.2	GEOMORFOLOGIA DE PAMPACOLCA	43
6.3	GEOLOGIA LOCAL	45
6.4	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	51
6.4.1	Fallas	51
6.4.2	Pliegues	51

#### CAPITULO VII: CONDICIONES LOCALES DE SUELO

7.1	GENERALIDADES	53
7.2	DESCRIPCION DEL TRABAJO DE CAMPO	55
7.3	PRUEBAS DE LABORATORIO	56
7.3.1	Densidad Relativa	56
7.4	CAPACIDAD DE CARGA DE LOS SUELOS	58
7.4.1	Capacidad de carga de los suelos de baja cohesión encontrados	60
7.5	ESTUDIO DE SUELOS EN CHUQUIBAMBA	62
7.5.1	Descripción de los suelos encontrados	62
7.5.2	Ensayos realizados	63
7.5.3	Estabilidad de taludes	68
7.5.4	Capacidad de carga de los suelos de Chuquibamba	70
7.6	ESTUDIO DE SUELOS EN PAMPACOLCA	71

7.6.1	Descripción de los suelos encontrados	71
7.6.2	Ensayos realizados	71
7.6.3	Capacidad de carga de los suelos de - Pampacolca	77

CAPITULO VIII: ESTUDIO DE DAÑOS POR EL SISMO DEL  
16/02/79

8.1	GENERALIDADES	78
8.2	ESCALA DE EVALUACION DE DAÑOS	79
8.3	CONSTRUCCIONES EXISTENTES EN LA ZONA	81
8.4	EVALUACION DE DAÑOS	83
8.4.1	Frecuencia de daños y fallas más co- munes observadas	83
8.4.2	Daños en Chuquibamba	85
8.4.3	Daños en Pampacolca	86
8.5	EVOLUCION DE LA TECNICA CONSTRUCTIVA	86

CAPITULO IX: INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LO-  
CALES EN LOS DAÑOS POR EL SISMO DEL  
16/02/79 EN CHUQUIBAMBA Y PAMPACOLCA

9.1	GENERALIDADES	89
9.2	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LOCALES EN LOS DAÑOS EN CHUQUIBAMBA	90
9.2.1	Topografía	90
9.2.2	Geomorfología y Geología	91
9.2.3	Suelos	92
9.3	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LOCALES EN LOS DAÑOS EN PAMPACOLCA	93
9.3.1	Topografía	93
9.3.2	Geomorfología y Geología	94
9.3.3	Suelos	95
9.4	ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	96
9.5	ZONAS DE EXPANSION URBANA	98

<u>CAPITULO X:</u> CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
BIBLIOGRAFIA	106
ANEXOS	

## RESUMEN

El presente trabajo contiene las investigaciones realizadas en las ciudades de Chuquibamba y Pampacolca, en el Departamento de Arequipa, motivadas por los efectos desastrosos que sufrieran estas localidades por el sismo del 16 de Febrero de 1979.

El trabajo se ha orientado al estudio de las condiciones locales existentes y la influencia que tienen en la generación de daños.

La región de Arequipa se caracteriza por una abundante actividad sísmica, debido a fuentes como el fallamiento de San Agustín que causan una modificación en la franja de concentración de focos sísmicos. Es notoria la gran cantidad de energía liberada, en forma constante, por medio de sismos de pequeñas magnitudes. La frecuencia de sismos para magnitudes mayores es significativamente menor.

La aplicación de la teoría estadística de valores extremos al caso de terremotos, ha servido para evaluar el peligro sísmico a que está expuesta la zona de interés. Estudiando la variación de los valores observados alrededor de los valores medios estadísticos puede hacerse una estimación cuantitativa acerca del peligro sísmico.

Se ha determinado que la función de valores extremos modificada se adecúa mejor a los valores observados. Esta función ha sido usada en la estimación del peligro sísmico. El modelo estadístico, sin embargo, no puede representar adecuadamente el comportamiento sísmico para magnitudes

pequeñas como es el caso de tener magnitudes 5 Mb.

Las localidades de Chuquibamba y Pampacolca son poblaciones importantes dentro del valle de Majes. Ambas se encuentran sobre los 2950 msnm y distan aproximadamente 250 Kms. de Arequipa.

Destaca en Chuquibamba el factor topográfico general que resulta tan impresionante ya que se encuentra dentro de una profunda hondonada. Esta hondonada contiene a varias terrazas de deslizamiento, una de las cuales sirve de asiento a la ciudad de Chuquibamba. Se puede establecer con seguridad que la zona de Chuquibamba se encuentra en condiciones de equilibrio inestable por la razón de que aún no se ha realizado un asentamiento definitivo entre los bloques deslizados.

Geológicamente el piso está conformado por depósitos del volcánico Sencca cuyas características favorecen la acción de los fenómenos geomórficos.

La población de Chuquibamba, por lo tanto presenta condiciones topográficas muy desfavorables. La ciudad se encuentra construída sobre una terraza fisiográfica que resulta insuficiente para contenerla pues las viviendas desbordan por todos los lados ocupando laderas muy empinadas.

Por el estudio de suelos, se ha determinado la predominación de suelos friccionantes. El análisis de la densidad relativa los clasifica como medianamente compactos a compactos, sin embargo su estabilidad es función de la topografía.

Se demuestra que las laderas de la quebrada Huacucani, ubicada al Sur de Chuquibamba, son potencialmente deslizables.

El estudio de daños se realizó en viviendas de adobe por ser el material predominante. Para la evaluación fue utilizada la escala MSK versión IGP 1979.

En base a este trabajo se ha establecido zonas de acumulación de daños severos en la parte norte de la población (Barrio Belén), zona adyacente a la quebrada Huacucani y la zona céntrica.

En los dos primeros casos, los daños se explican por la fuerte pendiente del terreno, que modifica el comportamiento dinámico de las edificaciones y por la deficiente técnica constructiva utilizada en estas viviendas relativamente nuevas. La zona céntrica, que está ocupada por construcciones muy antiguas, ha sufrido las consecuencias de daños acumulativos por eventos sísmicos anteriores.

En general, todas las viviendas de adobe fueron dañadas, obviamente unas más que otras pero todas evidenciaron los efectos del sismo.

Las condiciones locales de Pampacolca resultan asimismo muy interesantes.

Pampacolca se encuentra sobre un valle amplio de unos 3 Kms. de ancho por 9 Kms. de largo, cuyo origen es de tipo glaciar.

El valle de Pampacolca se formó en una de las

crisis climáticas del Cuaternario, cuando una lengua glaciaria aprovechó el cauce labrado por la anterior crisis climática ahondándolo y ensanchándolo hasta formar el valle en "U" actual.

Este glaciar de valle descendió hasta la cota - aproximada de 2800 msnm, donde depositó su morrena terminal; asimismo depositó morrenas laterales bastante potentes formando cerros de regular altura. Esta morrena está formada por clastos angulosos de andesita, basalto y riolita envueltos en una matriz arcillosa y forma el piso de Pampacolca y toda su campiña.

Pampacolca se encuentra sobre una zona relativamente plana, con una ligera inclinación hacia el SE, que de ningún modo presenta las condiciones tan adversas que existen en Chuquibamba.

Los suelos de Pampacolca, son depósitos areno limosos-arcillosos, con densidades relativas muy variadas. Rodeando a los cursos de agua existentes se encuentran estratos de gravas tipo GP, GW, con altas densidades relativas. La zonificación de suelos que se plantea tentativamente, ha sido basada en ese factor.

La evaluación de daños en construcciones de adobe en Pampacolca, ha servido para relacionar el grado de daño y el estado de compacidad del suelo. Esta correlación es muy adecuada en una zona con grados de daños severos, que se encuentra dominada por rellenos superficiales bastante potentes. Para el resto del área, la explicación de los daños obedece a la antigüedad de la construcción y a los defectos constructivos que constantemente se repiten.

Se plantean algunas recomendaciones generales - para mejorar las técnicas de diseño y construcción que actualmente son deficientes.

El efecto de las pendientes pronunciadas que se presentan en Chuquibamba y la acumulación de daños por sismos anteriores contribuyen a empeorar el panorama mostrándonos una ciudad con viviendas en precario estado, con alto peligro para sus habitantes debido a la estrechez de sus calles. Es recomendable realizar una adecuada renovación urbana teniendo en cuenta ciertas pautas generales - en la construcción.

- Siendo el adobe, por razones económicas, un material irremplazable en la zona, deberá tenerse especial cuidado en su elaboración y asentado. Las construcciones con este material deben limitarse a un piso y para las que tengan que sustentarse en terrenos con pendiente se recomienda efectuarlas sobre plataformas en corte.

- Debe evitarse el establecimiento urbano en las proximidades de la quebrada Huacucani.

- La expansión urbana en Chuquibamba se hará - en zonas adecuadas ubicadas al Sur del actual emplazamiento de la ciudad.

- Para el caso de Pampacolca, la expansión urbana no presenta mayores problemas porque ésta debe tender a ocupar los muchos terrenos sin construir, que existen dentro de la zona urbana.

## C A P I T U L O I

### INTRODUCCION

El sismo de Arequipa del 16 de Febrero de 1979, afectó una vasta área del Departamento, resultando dañadas la ciudad de Arequipa y varias localidades del valle de Majes.

Por la importancia de estas localidades y sus características especiales, se determinó realizar estudios específicos relativos al sismo en Arequipa, Camaná, Aplao, Corire, Huancarqui, Chuquibamba y Pampacolca.

La presente tesis es el resultado de las investigaciones realizadas en Chuquibamba y Pampacolca.

La investigación se ha orientado a establecer relaciones entre los efectos del sismo y las condiciones locales de los sitios de interés. Como consecuencia, se

desprenden recomendaciones en diseño y construcción, que utilizadas adecuadamente puedan servir para atenuar daños por futuros sismos en la zona. De igual manera se recomienda zonas convenientes para futuras expansiones urbanas.

La figura 1.1 ilustra el planteamiento general de la investigación.

En primer lugar, se estudia la sismicidad regional con el objeto de conocer las características sísmicas de la zona y estimar el riesgo sísmico a que está expuesta. Posteriormente, para cada sitio de interés se estudian las condiciones locales, que involucran la topografía, geomorfología, geología y condiciones locales de suelo, cuya importancia radica en las modificaciones que puedan imponer a las características de los movimientos sísmicos. - En tercer lugar, se evalúan las condiciones estructurales de las edificaciones existentes y mediante el daño observado se intentan relaciones con los aspectos tratados anteriormente.

El trabajo contó con una laboriosa etapa de campo, dividida en dos sub-etapas, de acuerdo a sus alcances.

Primeramente se realizó una evaluación de daños en las construcciones, para posteriormente analizar los resultados. Esta etapa fue complementándose posteriormente para obtener una distribución más densa en las ciudades de interés.

La segunda etapa de campo estuvo orientada al estudio de las condiciones locales de suelo y requirió el

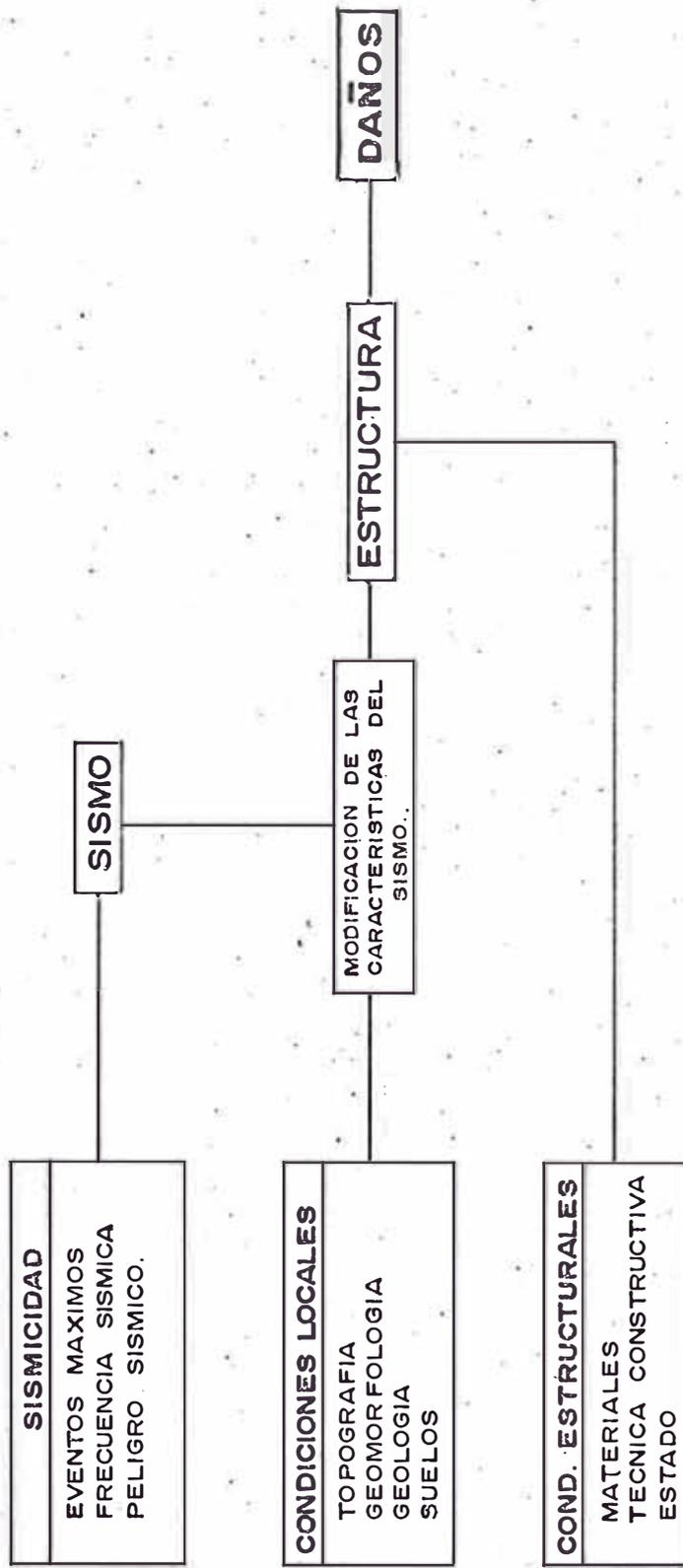


Fig. 1.1 Condiciones locales consideradas y su influencia en la generación de daños.

mayor esfuerzo. Para el efecto se realizaron excavaciones de exploración en las dos localidades, tomándose datos de estratigrafía y muestras de suelo que luego fueron analizadas en laboratorio. Para estos efectos, con la curiosidad e iniciativa de los compañeros de grupo, fue posible fabricar varios aparatos usados en la determinación de las características mecánicas del suelo.

La metodología descrita, por su sencillez y economía responde plenamente a nuestras condiciones de limitación de recursos para este tipo de estudios y puede utilizarse fácilmente para otras condiciones.

El trabajo realizado, por los aspectos multidisciplinarios que involucra la ingeniería Antisísmica, ha constituido un constante reto, al mismo tiempo que una valiosa experiencia.

Dejo constancia de la valiosa y desinteresada colaboración brindada por muchas Instituciones y personas, a las cuales reitero mi agradecimiento.

## C A P I T U L O

### ASPECTOS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 2.1 UBICACION GEOGRAFICA Y ACCESO

Las localidades de Chuquibamba y Pampacolca se encuentran ubicadas en el Departamento de Arequipa, dentro de las coordenadas  $72^{\circ} 31'$  de Longitud Oeste y  $15^{\circ} 40'$  de Latitud Sur.

Chuquibamba es la capital de la provincia de Condesuyos, por su parte Pampacolca es un distrito de la provincia de Castilla, están ubicadas sobre los 2950 m.s. n.m. y por su tamaño e importancia económica destacan entre las poblaciones situadas en las cabeceras del valle - del río Majes.

El acceso a la zona se hace a través de la carretera que parte del Km. 905.6 de la Panamericana Sur y se interna al valle del Majes (Véase la Fig. 2.1). Una

serie de poblaciones son conectadas por esta vía que finalmente converge en los sitios de nuestro interés.

## 2.2 CLIMA Y VEGETACION

El clima en la zona es tan variado como varía la altitud.

De acuerdo a datos de las Estaciones Climatológicas de Chuquibamba y Pampacolca, se pueden establecer las siguientes características climáticas:

	<u>CHUQUIBAMBA</u>	<u>PAMPACOLCA</u>
Precipitaciones líquidas anuales	entre 50 a 300 mm	
Temperatura máxima (Promedio anual)	19.4°C	16.5°C
Temperatura media mensual	20.8°C	20.4°C
Temperatura mínima media	3.4°C	- 1°C
Temperatura media	12°C	12.8°C

Existe gran diferencia de temperatura entre el día y la noche, aún en la estación seca, pero no tanta entre el sol y la sombra. Una peculiaridad de este clima es la presencia de neblinas al amanecer y al atardecer provenientes del Pacífico, llevadas por los vientos a lo largo del valle de Majes.

La altitud y la topografía influyen asimismo en la flora de la región. En la meseta predomina la yareta - empleada como combustible, el pasto ichu que sirve de forraje para el ganado y la tola. En las laderas y el valle se desarrollan la chilca, el molle, el sauce, el eucalipto

y variedades de cactáceas; aquí el hombre cultiva cereales, tubérculos e importantes cantidades de alfalfa. En las partes bajas existen frutas como higos, manzanas, etc.

### 2.3 POBLACION Y NIVEL SOCIO-ECONOMICO

El cuadro 2.1 resume los datos censales de poblaciones para 1972 y los valores estimados para 1980 en las dos localidades materia de estudio.

C U A D R O 2.1

LOCALIDAD	POBLACION CENSADA 1972			POBLACION ESTIMADA 1980		
	URBANA	RURAL	TOTAL	URBANA	RURAL	TOTAL
Chuquibamba	3008	1654	4662	3544	1950	5494
Pampacolca	2054	1956	4010	2464	2348	4812

La concentración de la población en la zona urbana en Chuquibamba es del 64.5%, en Pampacolca por otro lado es del 51.2%; la diferencia se explica por la mayor actividad de tipo agrícola que existe en Pampacolca.

Básicamente la agricultura y la ganadería, son las principales actividades que se desarrollan en estas localidades. Se cultivan productos como la alfalfa, papa, trigo, cebada y maíz, entre los principales. La ganadería esta especialmente dedicada al ganado vacuno. Pampacolca es un importante productor de leche, comercializando casi toda su producción a una compañía enlatadora.

No existen industrias de transformación. La actividad profesional más numerosa la constituyen los docentes de las escuelas primarias y colegios secundarios que existen. No se cuentan con datos con respecto a la distribución de ingreso per cápita; pero se puede afirmar que la mayoría de la población es de escasos recursos. En Chuquibamba el desequilibrio socio económico es menos notable que en Pampacolca donde es evidente que la mayor riqueza se concentra en pocas manos.

Existe una pequeña fábrica de ladrillos en Chuquibamba con una producción muy limitada por la poca demanda. En Pampacolca, recientemente se ha construido una obra similar. En ambas localidades se nota que la renovación y expansión urbanas son prácticamente nulas.

## C A P I T U L O    I I I

### ASPECTOS SISMOLOGICOS

#### 3.1 CARACTERISTICAS SISMOLOGICAS DE LA REGION

El área estudiada presenta características sísmológicas que ya han sido definidas a nivel de toda la franja circumpacífica; esto es sismos con focos superficiales (0 - 65 Kms.) que bordean la región costera y flanco occidental de la cordillera, entremezclándose con algunos focos de profundidad intermedia (65 - 300 Kms.) asociados con el vulcanismo reciente que se presenta al sur del paralelo 16°.

Para interpretar las características sísmicas dentro de la concepción de la dinámica terrestre, el Instituto Geofísico del Perú ha analizado detalles de la tectónica regional, basándose en datos de 9 estaciones regionales para 1266 eventos sísmicos en el año 1965. Los

resultados pueden resumirse así:

El relieve, la litología, la estructura superficial y sub-superficial y principalmente la distribución espacial de la actividad sísmica, son compatibles con la fenomenología a esperar en un proceso de subducción correspondiente a un borde continental en el que no existe arco de islas ni océano intermedio.

Se supone la existencia de una placa o manto oceánico, que a partir de la fosa se sumerge por debajo del continente, describiendo un ángulo de  $26^\circ$ , que tendría un espesor constante de 50 Kms. hasta una profundidad próxima a los 150 Km. que correspondería al grosor de la litósfera continental. En su parte final, la placa oceánica descendente se dobla y desaparece a través de un corto trayecto aproximadamente horizontal.

La placa oceánica descendente, esta dibujada por actividad sísmica que se produce dentro de todo su espesor, con notoria concentración de esta actividad hacia su límite superior. No existe actividad sísmica en esta placa antes de la fosa, ni entre ella y los sismos superficiales en la litósfera continental.

La notable concentración de la actividad sísmica casi en la parte central de la porción descendente de la placa oceánica, junto con el mecanismo focal de los dos últimos terremotos de Arequipa (1958 y 1960), sirvió para proponer la existencia del sistema de fallamiento de San Agustín, al que se interpreta como una profunda estructura de fracturamiento con desplazamiento de los bloques en el sentido del rumbo.

La abundante actividad sísmica existente en la región, se debe a las siguientes fuentes, en orden de importancia, teniendo en cuenta el número y magnitud de los eventos:

1) La profunda estructura a la que se ha denominado Sistema de Fallamiento San Agustín, la misma que en realidad presenta una perturbación o modificación de la franja de concentración de focos sísmicos descendente de la costa hacia el interior del continente.

2) Toda la extensión de la placa oceánica infradeslizante, lo que constituye característica común para casi todo el borde continental Sudamericano, y

3) Estructuras menores existentes en o cerca a la superficie, principalmente fracturas, que se distribuyen de Oeste a Este, desde delante de la fosa hasta de atrás de la Cadena Andina, con mayor profusión en la Costa y Vertiente Andina.

### 3.2 HISTORIAL SISMICO

La zona de nuestro interés presenta un historial sísmico muy amplio, encontrándose dentro de las poblaciones afectadas por terremotos con una intensidad probable de VII - XI M.M.

Una relación cronológica de los sismos más notables ocurridos en la región y que afectaron en forma significativa a la zona estudiada, se consigna más adelante. Las magnitudes anotadas para sismos en épocas remotas, que obviamente no tienen registros instrumentales, fueron establecidos por Silgado en base a relaciones empíricas -

entre la magnitud, intensidad y extensión areal de los sismos ocurridos en el Perú durante los últimos treinticinco años.

SISMOS NOTABLES OCURRIDOS EN LA REGION

1687, Octubre 21, entre las 6 y 7 horas. Sismo en Arequipa que causa grandes daños. Otros estragos causó en los valles de Majes y Sigwas. Magnitud probable 8.2.

1715, Agosto 22, a las 19 horas. Sismo destructor en el Sur del Perú. En Arequipa averió casas, quedando muchas inhabitables. Los derrumbes en las partes altas sepultaron a los pequenos pueblos situados en las colinas y en los valles.

1821, Julio 10, 08 horas. Sismo que causó grandes daños en los pueblos de Camaná, Ocoña, Caravelí, Chuquibamba y valle de Majes. Se contaron 60 muertos en Chuquibamba. Magnitud 7.9.

1868, Agosto 13, a las 16.45 horas. Terremoto grado IX acompañado de un tsunami. El historiador Dr. J.T. Polo se refiere a este sismo como uno de los mayores - que se hayan verificado en el Perú desde su conquista. Las observaciones macrosísmicas indicaron que - el epicentro del terremoto estuvo cerca del Puerto - de Arica. En Arequipa cayeron la mayor parte de templos, la Catedral quedó en ruinas.

No se tienen informes de los efectos de este terremoto en las localidades de nuestro interés, pero dada la intensidad verificada se puede deducir que fueron seriamente afectadas. Magnitud 8.6.

- 1913, Agosto 6, a las 17.13 horas, Caravelí quedó destruída por un terremoto de pocos segundos de duración. Sufrieron igualmente todos los pueblos del valle de Majes, especialmente Chuquibamba donde además de desplomarse la Iglesia Mayor, se deterioraron los edificios y viviendas. Magnitud 6.7 Mb.
- 1939, Octubre 11, a las 09.51 horas. Sismo en el Sur peruano, Chuquibamba es seriamente afectada, su Iglesia, cárcel y municipalidad presentan graves daños, además del desplome de muchas viviendas.
- 1942, Agosto 24, a las 17.51 horas. Terremoto en la región limítrofe de los Departamentos de Ica y Arequipa que se sintió fuertemente en Chuquibamba. Magnitud 6.9 Mb.
- 1948, Julio 20, a las 06.03 horas. Sismo ligeramente destructor en las poblaciones de Caravelí y Chuquibamba. Intensidad VI - VII M.M.
- 1958, Enero 15, a las 14:14 horas. Terremoto en Arequipa que causó 28 muertos y 13 heridos. Intensidad superior al grado VII M.M. En Arequipa los daños en las viviendas de sillar fueron cuantiosos. No se tienen referencias de los daños en las provincias de Arequipa. Magnitud 6.4 Mb.
- 1960, Enero 13, a las 10.40 horas. Terremoto en el Departamento de Arequipa. Chuquibamba queda casi en escombros. El terremoto dejó un saldo de 63 muertes y 200 heridos. Magnitud 6.5 Mb.

Este es el terremoto más reciente. Las crónicas

periodísticas dan cuenta de los devastadores efectos que ocasionó tanto en Arequipa como en la zona de estudio. - Por referencia de personas del lugar, los daños en Chuquibamba fueron tales, que se hizo necesario reubicar a familias enteras en la parte superior del poblado, lo que es el barrio de Belén actualmente, así como efectuar la demolición de varios inmuebles dado el calamitoso estado en que quedaron. Las vías de comunicación fueron interrumpidas en varios sectores y la ayuda a los damnificados se hizo a través de un puente aéreo mediante helicópteros.

En la figura 3.1 se muestran los epicentros de los dos últimos terremotos notables en Arequipa (1958 y 1960), - puede notarse que la distancia epicentral de éste último a las localidades de Chuquibamba y Pampacolca es del orden de 40 Kms.

### 3.3 EL SISMO DEL 16 DE FEBRERO DE 1979

El 16 de Febrero de 1979 a las 05:08:53 (tiempo local), ocurrió un sismo en el Sur del país que dejó un saldo de 18 muertos y un equivalente a cinco millones de dólares en pérdidas materiales.

El sismo, de una duración de movimiento significativo, de 45 segundos, tuvo una magnitud de 6.2 Mb y 6.9 Ms, valores proporcionados por la Agencia Internacional - NEIS (USA). La posición geográfica del hipocentro determinada por la misma agencia, usando 328 estaciones, fue 16.39° Latitud Sur, 72.658° Longitud Oeste y 53 Km. de profundidad. Estos últimos valores difieren algo de los determinados inicialmente (15.93°S - 72.45°W) realizado por el United States Geological Survey, utilizando sólo 49 estaciones.

El epicentro se localizó aproximadamente a 25 Km. al norte de Camaná y se ubica en la zona de "quietud" sísmica de Ica-Arica.

La intensidad máxima fue de alrededor de VII MSK en Camaná y el área sacudida con intensidad igual a mayor de IV MSK fue del orden de los 140,000 Km<sup>2</sup>.

### 3.3.1 REPLICAS

Después del sismo y hasta fines del mes de Mayo, se registraron 15 réplicas con magnitudes superiores a 4.5. El cuadro 3.1 contiene las características de dichas réplicas. En la figura 3.1 se muestra la ubicación geográfica de los epicentros del sismo del 16.02.79 y sus réplicas más importantes.

### 3.3.2 INTENSIDADES

La figura 3.2 muestra las isosistas del sismo del 16 de Febrero de 1979, realizadas en base a un reconocimiento de campo y una evaluación de daños en Arequipa, Camaná, Corire, Huancarqui, Aplao, Chuquibamba, Pampacolca, Viraco y Machahuay. Se puede observar que las isosistas presentan una forma elíptica con el eje mayor paralelo a la costa aproximadamente.

La máxima intensidad evaluada, fue de VII MSK en las poblaciones de Camaná y Corire cuyos factores de sitio (suelos arenosos y nivel freático alto) contribuyen a tener mayores daños.

Se observa que las intensidades decrecen rápidamente a medida que se aproximan a la cordillera. En Chu-

C U A D R O 3.1

REPLICAS DEL SISMO DE 1979 (AGENCIA NEIS-USA)

MES	DIA	TIEMPO ORIGEN H.M.S.	COORDENADAS		PROF. KM.	MAGNITUD		N°ESTA- CIONES
			LAT.SUR	LONG.W		MB	MS	
* 02	16	05 08 53.4	16.390	72.658	53	6.2	6.9	328
02	16	06 12 11.9	17.078	72.850	85	4.6	-	
02	16	17 18 20.0	16.500	72.656	52	5.4		171
02	16	23 40 03.9	16.872	72.793	62	-	-	8
02	16	23 58 42.9	17.557	72.746	33	-	-	6
02	17	10 41 15.6	16.627	72.656	79	5.1	-	68
02	18	16 53 15.9	16.962	72.708	73	4.7	-	9
02	20	09 02 43.1	16.698	72.740	56	5.2	-	61
02	22	11 55 27.6	17.018	72.058	76	4.8	-	6
02	24	07 16 14.9	16.629	72.814	70	4.8	-	25
03	07	01 21 11.1	16.184	72.039	126	5.1	-	40
03	11	09 40 29.5	16.735	72.807	62	5.0	-	11
03	20	21 52 34.3	16.795	72.545	58	5.1	-	9
04	25	15 55 18.4	16.057	73.418	69	4.8	-	11
05	02	12 15 24.7	16.639	72.694	66	4.5	-	10
05	27	05 07 05.0	16.694	72.705	65	4.6	-	24

\* EVENTO PRINCIPAL

quibamba los factores topográficos y geológicos que se discut<sub>u</sub>ten más adelante produjeron una intensidad entre VI y VII MSK. Hacia Viraco y Machahuay la atenuación de intensidades es notoriamente más rápida.

Materia de otra investigación es el caso de Aplao y Huancarqui (Distrito muy próximo a Aplao), donde se observó una intensidad de VI MSK a pesar de estar cerca al epicentro y a sólo 25 Kms. de Corire, donde se registró la máxima intensidad.

## CAPITULO IV

### SISMICIDAD

#### 4.1 NOTA INTRODUCTORIA

Los sismos son fenómenos frecuentes en nuestro medio que generan grandes pérdidas materiales y humanas de gran repercusión económica. Ante la imposibilidad de predecir en la actualidad, la ocurrencia de un sismo destructor, es interesante desde el punto de vista científico, económico y humano, conocer al menos la probabilidad de que un sismo importante ocurra en una región dada durante un periodo determinado.

En este capítulo se hace un estudio de sismicidad para el área de estudio por aplicación de la teoría estadística de valores extremos de Gumbel. Adicionalmente, se ha utilizado una nueva función de distribución sobre la base del análisis del proceso de terremotos, pro-

puesta y desarrollada en detalle por Chén Pei y Lin Pang - hui (1975) para zonas sísmicas en China.

Usando la nueva función de distribución, se ha estimado el peligro sísmico en la zona de estudio, calculando los períodos medios de ocurrencia de sismos y el límite máximo probable  $x_2$  para terremotos en la zona. Esto ha permitido calcular el número probable de sismos, para diferentes magnitudes, que podrían ocurrir durante los próximos 5 y 10 años por comparación con la frecuencia obtenida para el caso de terremotos pasados, en forma idéntica a la que sugiere Chén Pei y Lin Pang-hui.

#### 4.2 LA FUNCION DE DISTRIBUCION DE VALORES EXTREMOS Y SU MODIFICACION

##### 4.2.1 Determinación de la Función de Valores Extremos para Terremotos

Se ha podido establecer que durante un tiempo  $t$ , la mejor distribución acorde al proceso de los terremotos es precisamente la función de valores extremos.

Debido a las características especiales de la teoría de valores extremos, la demanda de datos observados, es relativamente modesta. No se requieren necesariamente todos los datos observados dentro de un período dado de tiempo, todo lo necesario son los valores máximos observados dentro de algunos períodos de tiempo relativamente cortos.

Debido a las características antes mencionadas, hay una ventaja especial en aplicar esta teoría al estudio estadístico de datos sísmicos, por cuanto frecuentemente sólo se registran los eventos más fuertes y se pasan por alto los más débiles.

La derivación de la función de distribución de valores extremos para terremotos, se hace usando las siguientes suposiciones:

Suposición 1

La distribución de frecuencia para terremotos de acuerdo a su magnitud, obedece la relación magnitud-frecuencia dentro de pequeños rangos de magnitud.

$$\log n(x) = a - bx \quad (1)$$

$$\log N(x) = A - Bx \quad (2)$$

$$n(x) = - \frac{dN(x)}{dx} \quad A = a - \log(b \ln 10) \quad (3)$$

Donde  $x$  es la magnitud sísmica  $M$ ;  $n(x)$  llamada frecuencia sísmica, es el número de sismos que ocurren dentro de una magnitud unitaria en la vecindad de  $x$ . El símbolo  $N(x)$ , llamado frecuencia acumulativa, es el número de sismos con magnitudes  $\geq x$ .

La relación magnitud-frecuencia de terremotos, muestra la relación proporcional entre grandes y pequeños movimientos. Alternativamente muestra la relación distributiva entre el número de sismos y sus magnitudes. Dividiendo la frecuencia acumulativa entre el número total de sismos, se obtiene la distribución porcentual de magnitudes.

Luego las ecuaciones (1) ó (2) pueden ser escritas en la forma de la función de distribución:

$$F(x) = 1 - \frac{\int_x^\infty dN}{\int_0^\infty dN} = 1 - 10^{-bx} = 1 - e^{-b'x}$$

$$b' = b \ln 10 \quad x \geq 0 \quad (4)$$

Donde  $F(x)$  es la función de distribución de magnitudes sísmicas. Esto es que si un terremoto ocurre, la probabilidad que su magnitud sea  $\leq x$  será  $F(x)$ .

### Suposición 2

Dentro de un período de tiempo  $t$ , el número de sismos cuya magnitud es mayor que un valor dado, es una variable de Poisson. De modo que la probabilidad que sucedan  $K$  terremotos es:

$$P(\xi = K) = \frac{\alpha^K e^{-\alpha}}{K!} \quad (5)$$

Donde  $\alpha$  es el número promedio de terremotos ocurridos en el intervalo de tiempo dado.

Sea  $g(x)$ , donde  $x$  es la magnitud, la función de distribución de valores extremos para grandes movimientos, que se trata de obtener. Si una serie de terremotos ocurren dentro de un tiempo  $t$ ,  $G(x)$  es la probabilidad de ocurrencia tal que el mayor evento tiene una magnitud  $\leq x$ . Si se denota este caso por  $B$ , entonces:  $P(B) = G(x)$ .

De acuerdo a esta idea, si el evento más grande tiene una magnitud  $\leq x$ , naturalmente la magnitud de todos los eventos (asumiendo que hay justamente  $K$  sismos) será  $\leq x$ .

Si un sismo ocurre, la probabilidad que su magnitud sea  $\leq x$  es  $F(x)$ , ecuación (4). Si  $K$  sismos ocurren, la probabilidad que todos tengan magnitudes  $\leq x$ , será la siguiente:

$$\underbrace{[F(x) \quad F(x) \quad F(x) \quad \dots \quad F(x)]}_{\kappa} = F(x)^{\kappa}$$

Este es el producto de dos casos independientes.

Por la ecuación de probabilidad total,

$$P(B) = \sum_k P(A_k) P(B/A_k)$$

Donde  $P(A_k)$  es la probabilidad que  $k$  terremotos - hayan ocurrido, probabilidad que es igual a la ecuación (5) y  $P(B/A_k)$  es la probabilidad que la magnitud de los  $k$  terremotos sea  $\leq x$  cuando los  $k$  terremotos ocurran, que es simplemente  $[F(x)]^k$ .

El término  $P(B)$  es la probabilidad que todos los terremotos tengan magnitudes  $\leq x$  dentro del tiempo  $t$ ; en otras palabras  $G(x)$ . Sustituyendo todos los valores en la última ecuación se obtiene lo siguiente:

$$P(B) = G(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha^k e^{-\alpha}}{k!} [F(x)]^k = e^{-\alpha [1-F(x)]}$$

$$P(B) = G(x) = e^{-\alpha e^{-\beta x}} = e^{-e^{-\beta(x-u)}} \quad (6)$$

$$\alpha = e^{\beta \mu} \quad \beta = b' = b \ln 10 \quad \mu = \frac{A}{B} \quad (6')$$

Donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\mu$  son constantes que pueden ser determinadas por datos observados.

#### 4.2.2 Estimación del Peligro Sísmico en un Futuro Cercano

Derivada la función de distribución de valores extremos y determinadas sus constantes asociadas, se discute su utilización. Conocidas  $\beta$  y  $\mu$ , la frecuencia media de terremotos con magnitudes sobre cero ( $\alpha$ ) puede ser calculada:

$$\alpha = e^{\beta\mu}$$

La función de distribución  $F(x)$  de magnitudes sísmicas también es encontrada, esto significa que la probabilidad de que alguna magnitud sea  $\geq x$  será  $[1 - F(x)]$ . Entonces de  $\alpha$  terremotos, el número total de  $N$  de terremotos de magnitudes  $\geq x$  será el siguiente:

$$N(x) = \alpha [1 - F(x)] = e^{-\beta(x - \mu)} \quad (7)$$

y su recíproco:

$$T(x) = \frac{1}{N(x)} = e^{\beta(x - \mu)} \quad (8)$$

es el intervalo medio de recurrencia de terremotos de magnitudes  $\geq x$ .

Si se tiene un período de tiempo dado, por ejemplo P años, el número medio de terremotos de magnitud x que pueden ocurrir será:

$$N_p(x) = PN(x) = \frac{P}{T(x)} \quad (9)$$

Por otro lado, en el período escogido de P años, el número de terremotos que ocurren, es  $N_s(x)$ .

En estas condiciones puede suceder cualquiera de las tres siguientes posibilidades:  $N_s(x) > N_p(x)$  ó  $N_s(x) < N_p(x)$  ó  $N_s(x) \simeq N_p(x)$  que es el caso más frecuente.

Los valores observados son mayores o menores que los valores medios estadísticos, reflejando la fluctuación de los valores observados alrededor de la media. Si  $N_s(x) > N_p(x)$  significa que el número de terremotos que actualmente ocurren supera al número medio probable y como resultado la probabilidad de recurrencia de terremotos futuros es relativamente pequeña.

En caso que  $N_s(x) < N_p(x)$ , existe una situación venidera de "necesidad de terremotos". Consecuentemente, la probabilidad de tener sismos futuros será relativamente grande.

Como resultado de estas comparaciones, puede hacerse una estimación cuantitativa acerca del peligro sísmico, usando la fluctuación de los valores observados alrededor de los valores medios estadísticos.

El cálculo de la probabilidad de ocurrencia, en -

en el caso que  $N_p(x)$  sea mayor que  $N_s(x)$  se hace usando la suposición (2), esto es que la probabilidad de que ocurran  $k$  terremotos dentro del tiempo es:

$$\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}$$

y la probabilidad de tener más de  $k$  terremotos es:

$$P(\epsilon > k) = 1 - P(\epsilon \leq k) = 1 - \sum_{r \leq k} \frac{\lambda^r e^{-\lambda}}{r!}$$

#### 4.2.3 Modificación de la Función de Distribución de Valores Extremos

La modificación de la función de distribución de valores extremos ha sido sugerida por los autores Chén Pei y Ling Pang (1975), considerando ciertos factores no concordantes con la realidad, que presenta la función no modificada.

Los factores que más destacan son los siguientes:

a) El período de retorno  $T(x)$  tiende a ser muy grande cuando la magnitud de los terremotos es muy pequeña.

b) Cuando la magnitud sísmica es relativamente alta, el valor  $T(x)$  tiende a ser pequeño. En la realidad sucede que cuando se plotean todos los datos de valores actuales observados en una región sísmica sobre coordenadas - probabilísticas, se encuentra que la curva tiene una tendencia a curvarse hacia abajo a magnitudes grandes.

c) Al mismo tiempo, cuando el tiempo tiende al -

infinito, la magnitud resulta increíblemente grande. Es impropio no considerar un límite probable a la magnitud sísmica en una región, basado en valores máximos registrados.

Asumiendo que la magnitud sísmica de una región tiene un límite  $x_2$  y manteniendo la ecuación (1) válida dentro del rango de magnitudes  $(0 - x_2)$ , la ecuación (4) se modifica para convertirse en:

$$F, (x) = 1 - \frac{\int_x^{x_2} dN}{\int_0^{x_2} dN} = 1 - \frac{e^{-\beta x} - \epsilon}{1 - \epsilon} \quad - (10)$$

$$0 \leq x \leq x_2$$

Donde  $\epsilon = e^{-\beta x_2}$  es un número pequeño. Consecuentemente, se tiene lo siguiente:

$$G, (x) = e^{-\alpha [1-F, (x)]} = e^{-\alpha \frac{e^{-\beta x} - \epsilon}{1 - \epsilon}} \approx e^{-\alpha [e^{-\beta x} - \epsilon]} \quad - (11)$$

$$-\ln \left[ -\ln G, (x) \right] = \beta (x - \mu) - \ln \left[ 1 - e^{-\beta (x_2 - x)} \right] \quad - (12)$$

Haciendo modificaciones correspondientes sobre las ecuaciones (7), (8) y (9), se obtiene lo siguiente:

$$N, (x) = \alpha [1-F, (x)] = \alpha \frac{e^{-\beta x} - \epsilon}{1 - \epsilon} = e^{-\beta (x - \mu)} \left[ 1 - e^{-\beta (x_2 - x)} \right] \quad - (13)$$

$$T, (x) = \frac{1}{N, (x)} = e^{\beta (x - \mu)} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\beta (x_2 - x)}} \quad - (14)$$

$$N_p(x) = P N, (x) = P/T, (x) \quad - \quad (15)$$

Cuando  $x \ll x_2$ , es decir cuando la magnitud es pequeña, el término  $e^{-\beta(x_2-x)}$  de las ecuaciones anteriores, tiende a cero. Cuando  $x$  tiende a  $x_2$ , que es lo mismo cuando la magnitud es grande, la curva que describe la relación entre  $x$  y  $-\ln [-\ln G, (x)]$  tiende gradualmente al valor extremo  $x_2$ . La cantidad  $x_2$  es el límite superior de la magnitud sísmica que ocurre en determinada región. En otras palabras, corresponde a la máxima magnitud, cuyo período de retorno tiende al infinito.

La determinación de los tres parámetros de la ecuación (12), se hace usando regresión múltiple y calculando los valores de corrección  $\Delta\mu$ ,  $\Delta\beta$  y  $\Delta x_2$  a los valores encontrados con la función no modificada. Se asume un valor inicial  $x_2$  agregando 1 ó 0.5 grados al valor máximo histórico registrado. El cálculo  $\Delta x_2$  calificará tal suposición.

#### 4.3 PELIGRO SISMICO PARA LA ZONA DE ESTUDIO

En este acápite se desarrolla la aplicación de la teoría descrita anteriormente, para estimar el peligro sísmico en la zona de estudio.

En la figura 4.1 se puede ver el área considerada en el estudio de sismicidad, así como la ubicación epicentral de los principales eventos ocurridos en el período comprendido entre 1900 y 1979. El área de influencia que, como puede verse está limitada por las coordenadas 70 - 78° Long Oeste y 14 - 19° Latitud Sur, se eligió considerando - las zonas de mayor liberación de energía sísmica, de acuerdo con E. Silgado (1974) y por consideraciones empíricas de

atenuación, de tal forma que un sismo de gran magnitud que ocurra fuera del área de influencia no genera perturbación apreciable en los sitios de interés.

De acuerdo con estas consideraciones, las conclusiones que se logren, tienen validez tanto para las poblaciones de interés, como las ubicadas en su proximidad como son las localidades del Valle de Majes, Camaná y Arequipa.

En la figura 4.2, se muestra la curva de frecuencia sísmica del área elegida, para el período de registro comprendido entre 1963 y 1979.

Es notable la gran actividad sísmica presente en el área, que se caracteriza sobre todo por una liberación de energía en forma continua mediante sismos de pequeña magnitud. Para el caso de sismos de magnitudes grandes, - puede notarse que la frecuencia sísmica disminuye apreciablemente.

La máxima magnitud registrada durante los 17 años considerados, es de 6.2 Mb, que corresponde justamente al sismo del 16 de Febrero de 1979.

La curva de frecuencia sísmica servirá para determinar el número de sismos ocurridos a la actualidad, que es el nombre del parámetro  $N_s(x)$  descrito en 4.2.2.

La determinación de la función de distribución de valores extremos, tanto la función original como la modificada, se hizo utilizando la información de eventos máximos registrados entre 1913 y 1979. Estos valores se establecen en el cuadro 4.1

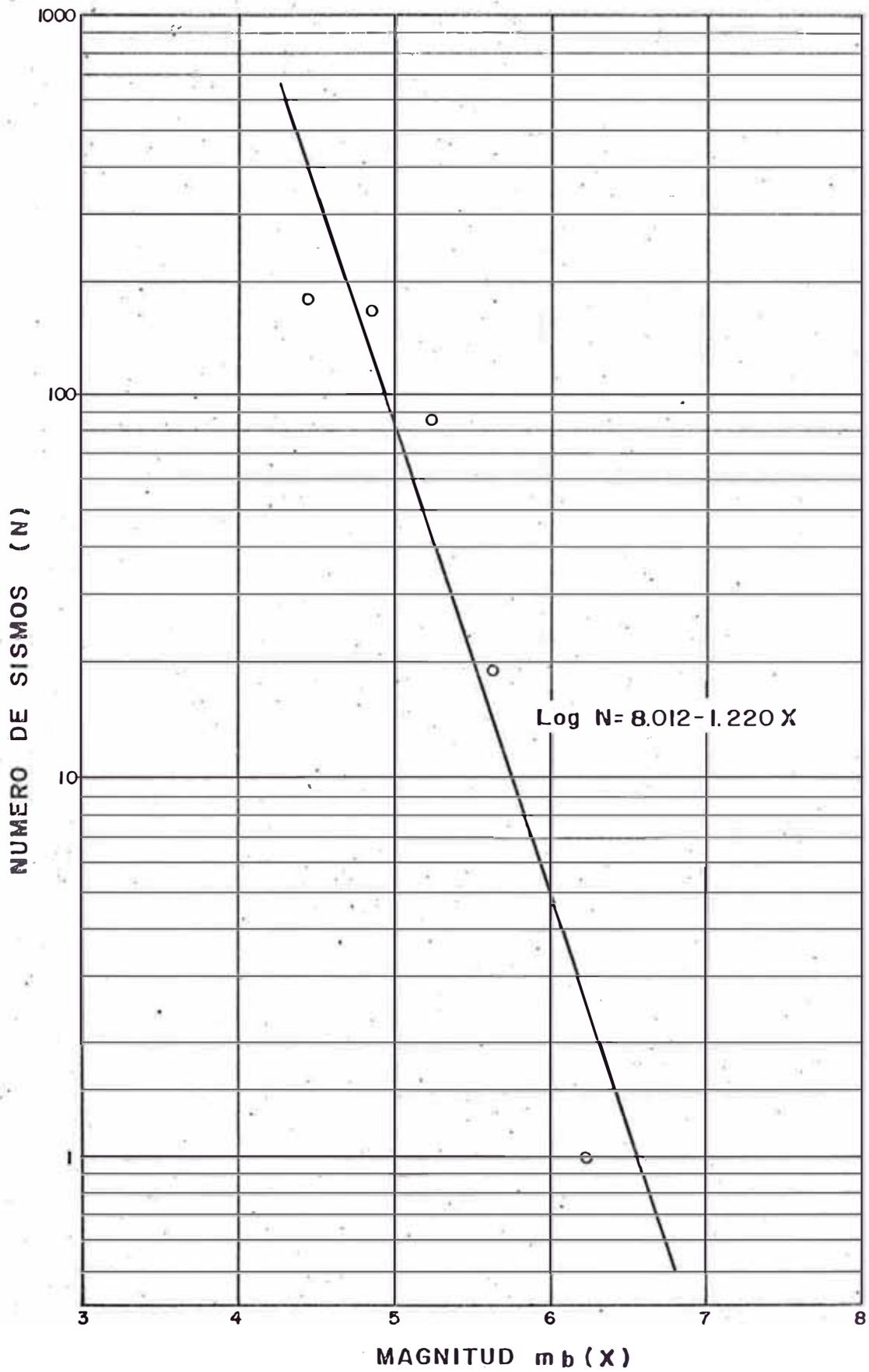


Fig. 4.2. Curva de frecuencia sísmica para el área de influencia. Período 1963-1979.

CUADRO 4.1

TERREMOTOS DE MAXIMA MAGNITUD OCURRIDOS EN EL AREA

AÑO	Mag. Mb	AÑO	Mag. Mb
1913	6.65	1958	6.39
1922	6.43	1959	6.26
1925	6.05	1960	6.48
1928	6.17	1961	5.54
1931	5.84	1962	6.10
1932	6.05	1963	5.20
1933	5.84	1964	5.30
1935	6.05	1965	6.00
1936	5.78	1966	5.50
1937	6.17	1967	5.60
1939	5.84	1968	5.70
1940	5.63	1969	5.90
1941	5.78	1970	5.90
1942	6.94	1971	5.70
1943	6.26	1972	5.70
1944	6.26	1973	5.70
1945	5.30	1974	5.80
1949	6.05	1975	5.90
1950	6.26	1976	5.70
1951	6.20	1977	5.90
1952	6.26	1978	5.40
1955	6.16	1979	6.20
1956	6.05		

La figura 4.3 contiene las funciones obtenidas; la numerada como 1 corresponde a la función original y la 2 es la función modificada. Puede notarse que existe buena resolución entre los valores observados y las funciones obtenidas.

La diferencia básica entre las funciones extremas obtenidas, radica en la estimación del período de retorno. Para magnitudes menores de 5 Mb, existe una pequeña diferencia entre el período de retorno dado por una y otra función. Para magnitudes  $\geq 6.5$  Mb la diferencia es más apreciable, siendo más adecuados, para este orden de magnitudes, los valores de período de retorno dados por la función modificada porque se ajustan mejor a la realidad.

Del mismo modo, la tendencia de la función no modificada es a crecer indefinidamente, de tal forma que se obtienen períodos de retorno relativamente cortos para magnitudes sumamente grandes. En este sentido, la función modificada considera una magnitud sísmica máxima  $x_2$ , que es función del máximo valor registrado, para la cual el período de retorno tiende al infinito, lo que equivale a tener una probabilidad de ocurrencia muy pequeña. La magnitud sísmica máxima  $x_2$  para el área de estudio resultó ser 7.1 Mb.

La figura 4.3 reafirma lo dicho anteriormente, respecto a la alta actividad sísmica observada en el área. Puede notarse por ejemplo que el período de retorno para sismos de magnitud 5.5 Mb, es de un año y para sismos de magnitud 5 Mb resulta apenas de 3.2 meses. De otro lado, cuando las magnitudes crecen, los períodos de retorno se incrementan rápidamente, por ejemplo para sismos de magnitud 6.5 Mb, el período de retorno es de 15 años usando

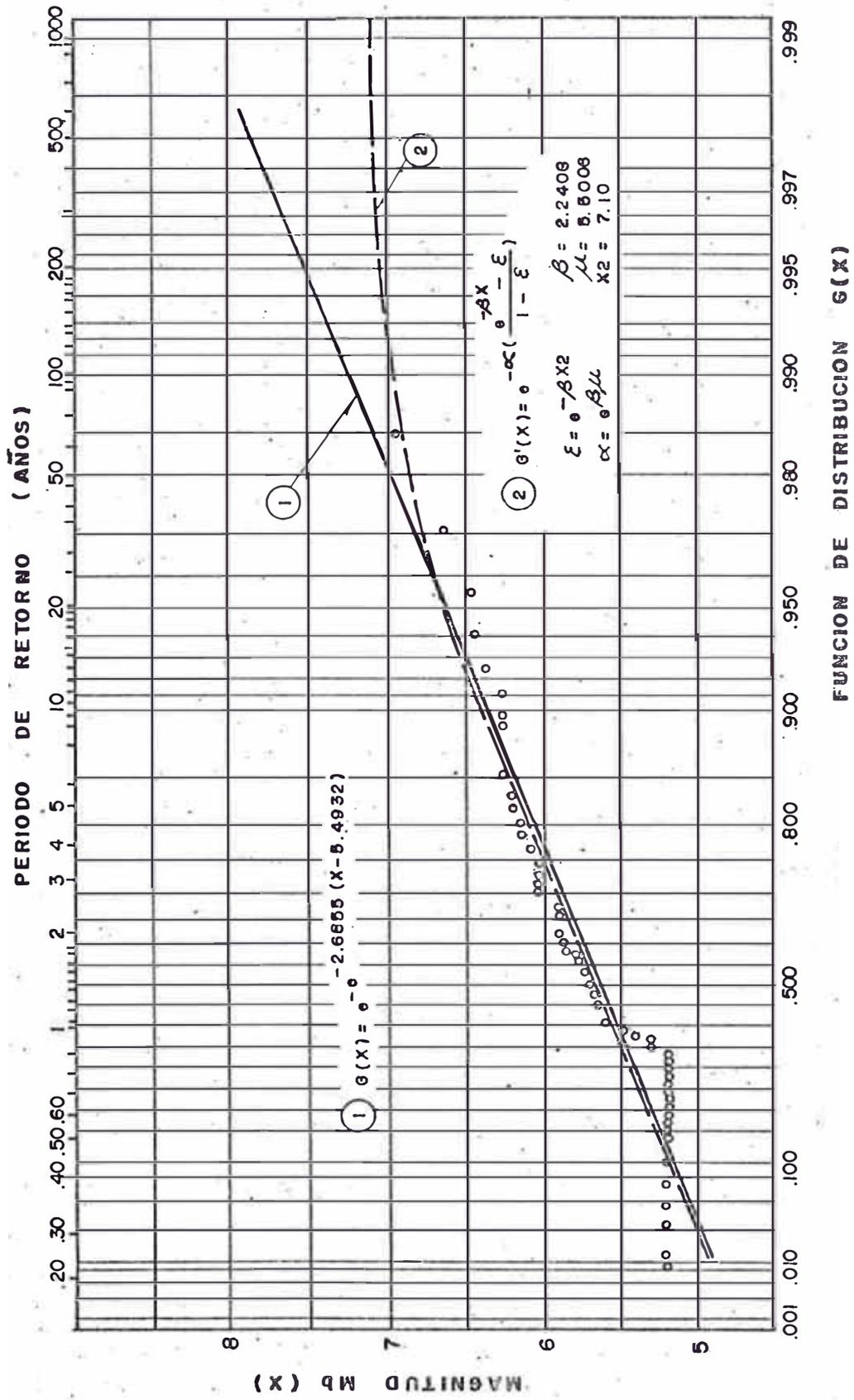


Fig. 4.3. Funciones de distribución de valores extremos para terremotos en la región de Arequipa.

la función original y 13 años con la función modificada; para sismos de magnitud 7.0 Mb el período de retorno es de 57 y 143 años usando la función original y modificada respectivamente.

Por medio de la función de valores extremos y su modificación, se puede evaluar el peligro sísmico en un futuro cercano. Si se toma un período de tiempo P de  $(m + 5)$  y  $(m + 10)$  años, donde m es en este caso igual a 17 años, - se puede estimar estadísticamente el número de sismos que ocurrirán en los próximos 5 y 10 años.

En el cuadro 4.2 se hace esta estimación para magnitudes Mb comprendidas entre 5 y 7.1 empleando la función modificada.

En este cuadro la fila Ns representa el número de sismos que han ocurrido en el período de m años. Las filas  $N_p(m + 5)$  y  $N_p(m + 10)$ , representan el número medio estadístico probable de sismos para períodos de  $(m + 5)$  y  $(m + 10)$  años, de manera que  $N_p(m + 5) - N_s$  y  $N_p(m + 10) - N_s$ , representan al número de sismos esperados durante los próximos 5 y 10 años respectivamente. En el cuadro 4.3 se puede ver la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

De acuerdo a ello no se esperan sismos de magnitud 7 Mb en los próximos 5 y 10 años, en cambio se espera un sismo de magnitud 6.5 Mb en 10 años con una probabilidad de 70%. Para  $M = 6$  Mb se tiene una probabilidad muy alta que sucedan 2 sismos en los próximos 5 años y se esperan 3 sismos en 10 años con una probabilidad alta en el caso que suceda el primero. Para magnitudes de 5.5, se espera un evento en los próximos 5 años y 6 en 10 años con una probabilidad alta.

CUADRO 4.2

Estimación del número de terremotos para los próximos 5 y 10 años en la región considerada, usando la función modificada.

Mag Mb	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.1
T, (x)	0.33	1.03	3.35	12.70	143.4	
N <sub>p</sub> (m + 5)	66.7	21.4	6.6	1.73	0.15	-
N <sub>p</sub> (m+10)	81.8	26.2	8.1	2.13	0.19	-
N <sub>s</sub>	81	20	5	1.0	0.3	0.2
N <sub>p</sub> (m+5) -N <sub>s</sub>	-14.3	1.40	1.6	0.73	0.12	
N <sub>p</sub> (m+10)-N <sub>s</sub>	0.80	6.2	3.10	1.13	0.16	

CUADRO 4.3

Estimación del peligro sísmico para el área en 5 y 10 años.

MAGNITUD Mb	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	
	5 años	10 años
7.0	Baja	Baja
6.5	0.5	0.68
6.0	0.80	0.82
5.5	0.75	0.90

Cuando las magnitudes son bajas, la función de valores extremos no se comporta adecuadamente.

Esta limitación se debe a que la teoría no toma en cuenta la influencia de las réplicas que hacen que el valor  $N_s$  sea siempre mayor que el valor probable  $N_p$  como es el caso que se tiene para  $M = 5$  Mb. Obviamente en este caso se infiere que la probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud 5 Mb es bastante alta aunque no se puede hacer una estimación del número probable de eventos esperados.

Es necesario aclarar que los resultados presentados involucran, como se ha hecho notar anteriormente, problemas todavía no resueltos por la teoría de valores extremos aplicada a la predicción de terremotos, sin embargo puede considerarse una buena alternativa de avance en la estimación del peligro sísmico.

#### 4.4 CONCLUSIONES

a) Se ha podido establecer que el área escogida presenta una sismicidad muy alta caracterizada por una gran frecuencia de eventos sísmicos de magnitudes moderadas, en tanto los eventos máximos presentan períodos de retorno relativamente largos.

b) De acuerdo a lo anterior se ha podido establecer un período de retorno para sismos de magnitud 5.0 Mb de sólo 3 meses, mientras que para  $M_b = 7.0$  resulta ser de 143 años.

c) La función de valores extremos modificada se adecúa mejor a los valores observados. Para esta función -

se ha calculado una magnitud de 7.10 Mb como valor máximo, para el cual el período de retorno tiende al infinito.

d) Para los próximos 5 años es probable la ocurrencia de 2 sismos de magnitud 6, no se esperan sismos de magnitudes 6.5 y 7.0.

e) Para los próximos 10 años, se esperan 3 sismos de magnitud 6.0 con probabilidad de ocurrencia de 0.82 y un sismo de magnitud de 6.3 con probabilidad 0.68. No se esperan sismos de magnitud cercana a 7 Mb.

f) El modelo estadístico no puede representar adecuadamente el comportamiento sísmico para magnitudes pequeñas como es el caso de tener magnitudes 5.0 Mb.

g) La información instrumental que se obtenga en los próximos años servirá para refinar las funciones de distribución y evaluar las estimaciones efectuadas.

## CAPITULO V

### CONDICIONES LOCALES EN CHUQUIBAMBA

#### 5.1 TOPOGRAFIA

La ciudad de Chuquibamba y su campiña, presentan un panorama interesante y muy sugestivo precisamente por encontrarse en una amplia hondonada, rodeada por una altísima escarpa. La escarpa de unos 800 m. de altura rodea a Chuquibamba en forma circular, tiene un arco de unos 300° y unos 7 Km. de diámetro; los 60° restantes corresponden a la abertura que da quebrada abajo. La orientación de la hondonada es de NW a SE, siendo la inclinación general del relieve hacia el Sur.

En la escarpa anteriormente mencionada se encuentran distribuidas algunas terrazas discretamente escalonadas. Chuquibamba se encuentra construída sobre una terraza fisiográfica que resulta insuficiente para contenerla,

pues las viviendas desbordan por todos los lados ocupando muchas de ellas laderas sumamente empinadas.

La Figura 5.1 y las fotografías 1, 2 y 3 son una muestra gráfica de lo mencionado.

La ciudad de Chuquibamba tiene por su parte un trazo regular, tres o cuatro calles principales cortadas ortogonalmente cada cincuenta metros. La parte céntrica de la ciudad presenta un relieve suave que súbidamente pasa a ser abrupto en las calles secundarias. Prácticamente las pendientes fuertes se presentan rodeando a la parte céntrica por sus cuatro costados.

Al sur de la población está la quebrada Huacucani, por la que discurre agua sólo en época de lluvias; en ella se observan taludes sumamente empinados en sus dos flancos donde asimismo se han construido muchas viviendas.

## 5.2 GEOMORFOLOGIA DE CHUQUIBAMBA

La explicación de la formación del singular relieve de la zona de Chuquibamba, es una labor interesante cuya importancia radica en conocer los fenómenos geodinámicos involucrados y que actualmente están presentes.

Se ha podido establecer que por encima de la costa 3800 m.s.n.m. y siguiendo la inclinación topográfica hacia el sur, se tiene un relieve suavemente ondulado a casi plano que constituye el antiplano andino. Este relieve cae bruscamente para constituir la gran hondonada de Chuquibamba. Por las relaciones estratigráficas se puede asegurar que durante el pleistoceno antiguo, toda la

profunda quebrada estuvo a la misma altura que el actual altiplano.

El relieve actual derivado a partir del relieve directo antes mencionado, se produjo debido a la abundancia de aguas superficiales y subterráneas durante las crisis climáticas del pleistoceno, por las que se desarrolla un fenómeno de deslizamientos del modo más sui géneris. - Las capas inferiores saturadas de agua jugaron el papel de un lubricante, con tal resultado que grandes partes de la corniza se desmembraban por gravedad a lo largo de planos de deslizamientos rotacionales. - Este fenómeno da lugar al gran desnivel que existe entre las cabeceras de Chuquibamba (3800 m.s.n.m.) y el puente Huario con 1400 m. s.n.m.

#### 5.2.1 INFLUENCIA DEL MATERIAL ROCOSO EN EL MOLDEADO

La influencia del material rocoso en el moldeado es bastante notable. Se anota a continuación los materiales que predominan en la zona y la forma en que influyen en la formación del relieve.

Los afloramientos de un conjunto detrítico - volcánico de lahares, tufos brechoides, tufos ignimbríticos intercalados con pequeñas secuencias detríticas (gravas), conforman la escarpa que rodea a Chuquibamba.

Todo el material que acabamos de describir, es fácilmente erosionable, por lo que se han abierto profundas quebradas que la mayor parte del año se encuentran secas, pero en los meses de lluvia son erosionadas.



① VISTA AEREA DE LA HONDONADA DE CHUQUIBAMBA. PUEDEN NOTARSE LAS TERRAZAS DE DESLIZAMIENTO EN UNA DE LAS CUALES SE ENCUENTRA ASENTADA CHUQUIBAMBA. AL FONDO EL ALTIPLANO ANDINO Y EL NEVADO COROPUNA.

RASGOS TOPOGRAFICOS DE CHUQUIBAMBA



② PANORAMICA TOMADA DESDE CARMEN ALTO. CHUQUIBAMBA APARECE AL FONDO EN LA PARTE CENTRAL. OBSERVESE LA ESCARPA QUE LA RODEA.



③ UNA CALLE DE CHUQUIBAMBA DONDE PUEDE NOTARSE LA GRAN PENDIENTE Y NATURALEZA DEL TERRENO.

En la línea final de la escarpa se tiene una roca de unos cincuenta metros de alto (Cabeceras de Chuquibamba) que va disminuyendo según la inclinación topográfica. La roca es una riolita de color rosado en base, sucedida por una riolita de color blanco que cubren toda la secuencia porosa que subyace, del mismo modo cubren parcialmente las rocas ígneas intrusivas.

La roca aunque compacta constituye así un relieve postizo, añadido. Se tiene el caso típico de la colada por encima y un substrato permeable en su base, favoreciendo así a que se desarrolle un nivel acuífero.

#### 5.2.2 INFLUENCIA DE OTROS FACTORES EN EL MOLDEADO

Existen muchos otros factores externos que influyen en el moldeado, tenemos por ejemplo que la abundancia de agua influyó en forma contundente en la formación del relieve actual (deslizamientos). En el presente, debido a las lluvias en los meses de Enero a Marzo se puede ver cómo es afectada su corniza comprometiendo incluso su estabilidad.

La erosión fluvial efectuó un intenso trabajo de socavación debido al fuerte desnivel existente, entre las cabeceras de Chuquibamba y su desembocadura en el río Majes. Este trabajo fue favorecido por la fácil erosibilidad de las capas inferiores. Actualmente las aguas siguen su trabajo de erosión en la tentativa de estabilizar la curva de equilibrio de su propio cause, ya que el desnivel entre desembocadura y cabecera es aún muy pronunciado. Por esto la acción dinámica de las aguas de escorrentía sigue siendo extraordinaria.

El vulcanismo ha afectado a la zona en grado sumo, siendo un factor muy importante de la geomorfología, ya que su evaluación fue sellada por emisiones volcánicas distintivas.

Así pues, durante el Plioceno Superior, Pleistoceno se desarrolla una etapa de actividad piroclástica, - es así que encontramos las diferentes secuencias; primeramente el tufo Sencca presentando intercalaciones detríticas; luego se tienen tufos brechoides y tufos ignimbríticos (intercalados) de los conglomerados secundarios. Una vez que aparece la barrera volcánica (Pleistoceno) se produce una actividad de tipo lávico, tal como se aprecia en las riolitas de tipo ácido. Posteriormente fueron sucedidos por rocas básicas (andesitas).

Los efectos de los sismos desde el punto de vista de las posibles consecuencias que haya podido tener en los flancos tan empinados del valle, es decir donde se encuentran distribuídas las terrazas de deslizamiento es explicada seguidamente. Es muy posible que además de los efectos que produjeron las crisis fluviales del Pleistoceno, los mecanismos cataclásticos hayan intervenido confabulándose así un conjunto de circunstancias favorables para producir la rotura y deslizamiento de la corniza. Actualmente, cuando se manifiestan sacudidas sísmicas, como las producidas en Enero de 1958 - 1960 y el sismo que nos ocupa, se produjeron efectos desastrosos en las construcciones de adobe y piedra o mixtas de los centros poblados de la hondonada. Se estima que las características de suelo y las condiciones de equilibrio inestable, por el hecho que aún no se ha realizado un asentamiento definitivo, han contribuído a que las consecuencias sean tan ruinosas.

### 5.3 LAS TERRAZAS DE CHUQUIBAMBA

Al ocuparnos de la descripción de la hondonada se hizo referencia a las terrazas fisiográficas que se encuentran en ella, una de las cuales justamente está ocupada por la ciudad de Chuquibamba.

Estas terrazas se notan a partir del fondo de la hondonada distribuidas en dos o tres planos más o menos amplios y extensos, formando las laderas mismas de Chuquibamba.

Se trata de terrazas de deslizamiento, o si se quiere de rotura y resbalamiento del terreno primitivo. En épocas pretéritas, la superficie de las diversas terrazas estuvo a la misma altura de la meseta andina. Las terrazas se han producido pues, por resbalamiento de bloques a lo largo de planos de rotura subverticales ligeramente encorvados hacia afuera (Véase la Fig. 5.2). Por esto, los bloques deslizados han sufrido una pequeña inclinación en contrapendiente de modo que en ellos los bancos rocosos (colada de riolitas) no se presenten horizontales y a causa del resbalamiento sufrido estas rocas están desarticuladas y amontonadas en las terrazas como puede verse en la fotografía 2.

### 5.4 MORFOGENESIS DE CHUQUIBAMBA

La evolución del relieve de Chuquibamba se muestra en forma secuencial en los diagramas de la figura 5.3.

### 5.5 GEOLOGIA LOCAL

En el área de estudio afloran rocas sedimenta-

rias, intrusivas, extrusivas y depósitos clásticos recientes (Véase la Fig. 5.4).

VOLCANICO SENCCA.- Los depósitos del volcánico Sencca tienen un carácter regional muy importante.

En el área de Chuquibamba se encuentran rellenando la depresión formada en el Plioceno. Su potencia es de alrededor de 70 a 80 m., sus afloramientos se encuentran en ambas laderas a partir de más o menos el pueblo de Iray donde el río no ha profundizado y deja expuesto este tufo.

El volcánico Sencca consiste en un tufo rosado conteniendo clásticos de variados tamaños.

Edad: Se le considera de edad pliocénica, superior a pleistocénica con 3.05 millones de años.

VOLCANICO CHILA Se encuentra suprayaciendo al volcánico Sencca y conformando las terrazas constituidos por piroclásticos e intercalaciones detríticas. Cubriendo a esta secuencia se tienen las coladas de riolita de color rosado y blanco. La descripción de estos últimos es como sigue: Textura porfiroide, matriz afanítica, color rosado o blanco grisáceo, cristales y fragmentos de cuarzo, vidrio volcánico biotita, fragmentos de pómez.

Edad: Se le considera de edad correspondiente al Pleistoceno Antiguo con 2.35 millones de años.

VOLCANICO BARROSO.- En el área de estudio se encuentra sobreyaciendo a las riolitas. Litológicamente esta constituido de lavas andesíticas. Los componentes

macroscópicos en una textura porfirítica son minerales ferro magnesianos como la biotita, horblenda, augita. Las rocas presentan un color gris en superficie fresca y un color amarillento a marrón cuando están intemperizados.

ROCAS INTRUSIVAS.- Cerca del pueblo de Iray se reconoce un afloramiento aislado de granito, constituyendo un pequeño macizo.

Sus características macroscópicas son color rosado a rojizo, textura macro granular holocristalina, esta compuesta de ortoza en grandes cristales simples y macclados. Además presenta cuarzo, muscovita y horblenda.

Edad: Probablemente de edad Ordoviciaca.

DEPOSITOS CLASTICOS RECIENTES.- Bajo esta denominación están los depósitos aluviales, cluviales y sólidos que cubren a las formaciones más antiguas.

## C A P I T U L O VI

### CONDICIONES LOCALES EN PAMPACOLCA

#### 6.1 TOPOGRAFIA

La fisiografía de la zona de Pampacolca se caracteriza por su gran variedad de relieves. La figura 6.1 muestra esta condición, mescolanza de cerros, quebradas, mesetas y valles profundos.

La localidad de Pampacolca y su vasta campiña se encuentran sobre un valle amplio de unos 3 Kms. de ancho por 9 Kms. de largo. Este valle tiene una ligera pendiente hacia el SE y una característica peculiar es su sección en "U" que denota su origen glaciar. El cerro Antipampa que lo limita por el NE, es justamente, el resto de una morrena lateral.

Curiosamente, a pocos kilómetros de Pampacolca se presenta un fenómeno geológico conocido como "captura

de ríos"; mediante el cual el río Llato cruza el valle de Pampacolca y "captura" al río Chilicay. Este fenómeno ha dado lugar a que la planicie de Pampacolca haya quedado suspendida.

El paisaje se encuentra dominado por la hermosa y amplia campiña de Pampacolca y por el impresionante nevado Coropuna que se presenta al Norte de la Zona. Al Oeste se encuentra el antiplano andino, referido anteriormente al tratar Chuquibamba y que presenta altitudes por encima de los 4000 m.s.n.m.

Con respecto a la zona urbana de Pampacolca, se puede anotar que se encuentra ubicada sobre una zona relativamente plana a 2950 m.s.n.m., enmarcada en dos cursos de agua: al NE el río Chilicay que discurre encajonado como un curso de agua estacional y al SO por una acequia de regantes que presenta un curso de agua regular durante el año. Es justamente por la zona adyacente a esta acequia por donde se observan pendientes pronunciadas en algunas calles.

El aspecto urbano, que corresponde más bien a un aspecto semi rural, se caracteriza por la estrechez de sus calles que siguen un trazo ortogonal característico. El mayor porcentaje de viviendas está conformado por edificaciones de adobe y rústicas, muchas de ellas antiguas, siendo la densidad de viviendas por manzana de área urbana relativamente baja.

## 6.2 GEOMORFOLOGIA DE PAMPACOLCA

La geomorfología de la zona de Pampacolca está

dominada por las cinco crisis climáticas del Cuaternario, descritas por Laharie y colaboradores; existen evidencias de climas más antiguos, pero no tienen influencia en la geomorfología actual.

La cuarta crisis climática es la que ha dejado la más espectacular muestra de su acción geomórfica, referidas a la creación del valle de Pampacolca moldeada por una lengua glaciaria que aprovechó el cauce labrado por la anterior crisis climática, ahondándolo y ensanchándolo hasta formar el valle en "U" actual. (Fig. 6.2).

Este glaciar de valle descendió hasta una cota aproximada de 2800 m.s.n.m., en donde depositó su morrena terminal. El glaciar también depositó morrenas laterales bastante potentes formando cerros de regular altura, como el cerro Antipampa al Este del valle. En el lado Oeste, sólo quedan algunos vestigios de morrenas al pie del bato lito.

La segunda fase de esta crisis se distinguió por el retroceso del glaciar que fue colmatado el valle al depositar su morrena terminal. Hacia el final de esta fase posiblemente se formaron uno o más lagos detrás de la morrena terminal en una llanura donde desembocaba el río - Chilincay o Tastane. En el resto de la zona la disminución de las precipitaciones provocó la formación de profundas - quebradas y el aumento del poder de erosión lineal de los ríos, uno de estos, el Llato, por su rápida erosión regresiva, hizo retroceder su cabecera hasta capturar al río Chilincay.

La quinta crisis climática está evidenciada por las terrazas fluviales halladas en los pocos ríos perennes

de la región, por los potentes y extensos depósitos aluviales, coluviales y por abanicos aluviales, todos estos depósitos han sido disecados por las arroyadas de las temporadas de lluvias actuales.

Existen terrazas fluviales compuestas por clastos subredondeados envueltos en una matriz areno-limosa, a veces intercalados con bancos lenticulares de limos, ubicados en los valles de los ríos Llato, Chilincay, Llacllajo, Caspanja y Sihuarpo. En cuanto a los depósitos eluviales, éstos se presentan en todas las laderas fuertes de todos los valles de la cuenca de erosión, los más característicos son los del valle de Llato, donde forman abanicos de diferente potencia y longitud; también se encuentran en el valle de Llacllajo y en Pampacolca. Todos estos depósitos se encuentran profundamente disecados por angostas y hondas quebradas, las cuales muestran la composición de estos depósitos, clastos angulosos envueltos en una matriz arcillosa.

Los depósitos coluviales se encuentran en el lado Oeste del valle de Pampacolca, existen otros pero son más reducidos. Tienen la misma composición que los depósitos aluviales, pero muestran una burda clasificación de acuerdo al tamaño, alternándose lentes de clastos del porte de guijarros con bloques de regular tamaño; la pendiente de estos depósitos es mucho menor que la de los eluviales.

### 6.3 GEOLOGIA LOCAL

Las rocas volcánicas son las más extendidas en el área. Varían en composición de riolita a basalto, así mismo en textura y forma (mantos, coladas, domos, etc.). Todos

estos volcánicos son del Cuaternario y sólo una pequeña parte pertenece tal vez al Terciario.

Las rocas sedimentarias, incluyendo a los depósitos clásticos recientes, ocupan una apreciable parte del área total, estas rocas se han datado como pertenecientes al Jurásico, Cretáceo Terciario y Cuaternario.

En el resto del área afloran rocas de carácter intrusivo y de muy variada composición y estructura, acompañados de rocas metamórficas, formando una especie de complejo intrusivo de edad Cretácea Superior a Terciaria Inferior. (Véase Fig. 6.3).

#### ESTRATIGRAFIA

Gneiss Pre-Cámbrico.- Aflora en la periferie del Complejo Intrusivo, en forma de pequeños cuerpos de variada forma y dimensión. Es de color rosado claro, de típica estructura bandeada, siendo las bandas claras de cuarzo y feldespato potásico y las bandas oscuras de cuarzo, horblenda y algo de biotita.

La edad de este gneiss se ha correlacionado con el gneiss Charcani de Arequipa y el gneiss que aflora en - Majes, datadas como del período pre-cámbrico.

#### Grupo Yura

Edad : Mesozoico, Jurásico Sup, Caloviano Cretáceo Inferior.  
Nombre : Jenks (1948), Benavides (1964), Anaya (1964).  
Potencia : Más de 100 m.

Localización : El grupo Yura forma una serie de cerros al Este del valle de Pampacolca. Sus estratos tienen un rumbo general NW - SE y buzanan hacia el SO.

Según Anaya Vargas (1964), afloran los cinco miembros del grupo Yura:

- Miembro Puente.- Constituido por areniscas blancas basales y lutitas negras pizarrosas con algo de calizas oscuras. Se encuentran en la quebrada de Llato.
- Miembro Chachíos.- Conformado mayormente por lutitas grises y marrones oscuras intercaladas con areniscas grises. Se hallan en el cerro Tullo Huara y en las faldas del Mauca Chupacra.
- Miembro Labra.- Formado por potentes capas de areniscas de colores claros, de grano fino, intercaladas con lutitas más oscuras de poco espesor. Afloran en el cerro Mauca Chupacra.
- Miembro Gramadal.- Conformado por calizas grises masivas intercaladas con lutitas abiganadas. Se ubican en las faldas del cerro Mamas.
- Miembro Hualhuani.- Formado por areniscas cuarzosas grandando a cuarcitas muy resistentes a la erosión. Se encuentran en las faldas del cerro Mamas.

#### Formación Murco

Edad : Mesozoico, Cretáceo Medio, Albiano.

Nombre : Jenks (1948), Benavides (1964), Anaya (1964).

- Potencia : 350 m.
- Localización : Se encuentra al SO del valle de Pampacolca, formando el cerro Curhuani, entre los valles del Llato y Llacllajo y en la parte superior del cerro Mamas.
- Litología : Está compuesta de lutitas abigarradas, intercaladas con areniscas grises claras a amarillentas. En la parte superior pasan gradualmente a calizas arcillosas y a calizas masivas de Formación Arcurquina.

#### Formación Arcurquina

- Edad : Mesozoico, Cretáceo Medio, Albiano-Turoniano.
- Nombre : Jenks (1948), Benavides (1964), Anaya (1964).
- Potencia : 500 m.
- Localización : Cima del Cerro Mamas, al SE de la zona.
- Litología : Está conformada por calizas masivas de color gris a marrón amarillentas, intercaladas con lechos de margas y capas de calizas arcillosas y lutitas claras.

#### Vulcanismo Terciario Tacaza

- Edad : Cenozoico, Terciario Indeterminado.
- Potencia : De 10 a 30 m.
- Localización : Al N de la población de Pampacolca, al SO del Coropuna y en las quebradas de Sihuarpo, Pampa Chacra y Cospanja en el sector Sur Oriental de la zona.

Litología : Potentes capas de tufos, marrones, claros a oscuros en superficie intemperizada, de naturaleza riolitica.

#### Vulcanismo Cuaternario

Edad : Cenozoico, Cuaternario Pleistoceno al reciente.

Nombre : Mendivil (1965), Laharie (1973)

Potencia : Más de 2000 m. en conjunto.

Localización : Forma el nevado Coropuna, la Meseta Andina y parte de la cuenca de erosión.

Litología : Muy variable de acuerdo a sus divisiones:

- Chila.- Derrames andesíticos y brechas, ubicados en la cuenca de erosión y en los flancos del Coropuna.
- Barroso.-Mantos lávicos de riolita y dacita, derrames andesíticos y basálticos; piroclásticos. Forman el Coropuna y la meseta Andina.
- Reciente.-Coladas basálticas sobre las fallas del Coropuna.

#### Depósitos Clásticos Cuaternarios

Edad : Cenozoico, Cuaternario, Pleistoceno al reciente.

Nombre : Laharie (1973)

Potencia : Muy variable

Localización y Litología:

Entre los depósitos clásticos recientes, destaca el material morrénico del valle de Pampacolca, conformado por clastos angulosos de andesita, basalto y riolita de pocos centímetros a varios metros de diámetro, envueltos en una matriz areno-arcillosa. Este material forma el subsuelo de Pampacolca y la campiña aledaña.

Es notable la presencia de grandes bloques de andesita y riolita, los que actualmente están en proceso de descomposición.

El cerro Antipampa, al NE de Pampacolca, está formado íntegramente por material morrénico que constituye restos de una morrena lateral.

La potencia de todo este manto morrénico ha sido calculada en unos 250 a 300 m. En la quebrada del río Lla to se puede ver íntegramente este espesor. En este mismo lugar el material morrénico descansa sobre lechos de lutitas y areniscas bastante trituradas de la formación Yura.

#### Complejo Intrusivo de Pampacolca

Aflora al pie de la corniza que da al valle de Pampacolca. El afloramiento se extiende en forma alargada siguiendo un alineamiento NW - SE, exponiendo rocas de composición variada como son la diorita, tonalita, grano diorita, gabro, pegmatita, diques de cuarzo y gneiss micáceo.

Edad y Correlación.- Debido a la variedad, tanto en composición como en estructuras, se agrupan a estas rocas bajo el término de "Complejo intrusivo de Pampacolca". Por su alineamiento NW - SE, puede ser la prolongación del Batoli

to de la Caldera y por lo tanto tener su misma edad, o sea del Cretáceo Superior al Terciario Inferior.

#### 6.4 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

##### 6.4.1 Fallas

Se observan dos sistemas de fallas, el primer sistema está orientado de NE - SW, son del tipo gravitacional y mucho más antiguas que las fallas del otro sistema. El segundo sistema tiene orientación NW - SE siendo de formación reciente y presenta desplazamiento horizontal y vertical.

Al primer sistema pertenecen las fallas de Llato, Pampachacra y Sihuarpo, de considerable salto puesto que ponen en contacto a la Formación Murco con el grupo Yura. Estas fallas tienen un buzamiento casi vertical.

Al segundo sistema pertenecen las fallas de Pampacolca, Blanco y Tampullo, éstas dos últimas se ubican en la puna baja y tienen poco salto y pueden ser catalogadas como grandes diaclasas.

En el valle de Pampacolca se ubica la falla del mismo nombre, la más extensa de la zona pues tiene 15 Km. de longitud reconocidos fotogeológicamente en su mayor parte, presentando un salto aproximado de 5 m. Estas fallas afectan rocas del Cuaternario y poseen buzamiento casi vertical.

##### 6.4.2 Pliegues

Se hallan sólo en rocas sedimentarias. El mayor

pliegue se observa en la margen derecha del valle de Lla-  
to.

Las fallas y pliegues indudablemente fueron cau-  
sadas por la Orogénesis Andina, por lo tanto, tienen una  
edad comprendida entre el Terciario a la actualidad, sien-  
do los pliegues más antiguos que las fallas, puesto que -  
éstas afectan a los pliegues.

## C A P I T U L O   V I I

### CON DICCIONES LOCALES DE SUELO

#### 7.1 GENERALIDADES

Se ha demostrado, a lo largo de la experiencia acumulada, que las características de las ondas sísmicas durante su trayectoria, se ven influenciadas por las condiciones del medio a través del cual se propagan, en este caso el suelo.

En algunos casos, las condiciones son tales que las características de las ondas en la última etapa de su trayectoria se determinan por las condiciones locales del sitio y tienen poca influencia los factores relacionados con el mecanismo de falla y con la etapa precedente a esta etapa.

Estas consideraciones que fueron intuídas desde más o menos el siglo XVIII se confirmaron en 1923 en el -

sismo de Kanto que destruyó la ciudad de Tokio, donde fue claramente notoria la correlación entre los daños ocurridos y las condiciones del suelo. En nuestro país, los casos más notables son los de Huaraz y Chimbote, durante el sismo del 31 de Mayo de 1970.

La correlación mencionada anteriormente, constituye una base importante de la técnica de microzonificación.

Desde este punto de vista, el comportamiento dinámico de los suelos "in situ" , puede distinguirse de dos maneras:

En primer lugar, se consideran los depósitos de suelo relativamente compactos a muy compactos, en los cuales las vibraciones sísmicas se transmiten con amplificaciones o atenuaciones, pero no se originan pérdidas de resistencia o deformaciones locales importantes, creando efectos en las estructuras pero sin daños directos en su cimentación. En este caso, las condiciones de resistencia del suelo pueden considerarse como estables y el problema consiste en la evaluación de las oscilaciones que el suelo transmite a la estructura, y, en definitiva en impartir a ésta última una adecuada resistencia respecto a las cargas dinámicas horizontales.

De otro lado, pueden encontrarse depósitos de suelo en estado suelto a muy suelto, parcial o temporalmente saturados de agua. En estas circunstancias puede suceder que por efecto de las vibraciones sísmicas se origine en el suelo de cimentación una pérdida de resistencia al cortante en forma parcial o total, o se susciten importantes densificaciones del suelo que se manifiestan por asentamientos diferenciales, grandes asentamientos totales, fisuraciones, -

surgencia de agua, licuación, etc. En este caso la condición del terreno será inestable para la cimentación y el problema consiste en la evaluación del potencial de colapso del depósito de suelo bajo la acción de un terremoto de proyecto (véase la figura 7.1).

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se plantea una metodología simple basada en una observación adecuada, que puede bastar en muchos casos, para evaluar las propiedades del suelo de cimentación. Para ello es necesario consignar una descripción sencilla de la naturaleza del suelo como rocas, gravas, arenas, arcillas; anotar su calidad en forma general y su probable estado de compactación en función de la densidad relativa o consistencia de acuerdo a su clasificación.

Esta técnica cuenta con la excepcional ventaja de requerir el mínimo de equipo de exploración y un número reducido de pruebas de laboratorio y viene a ser la contraparte sumamente económica de utilizar pruebas y equipos sofisticados de evaluación.

La evaluación de las propiedades del suelo servirán finalmente para proponer normas y recomendaciones generales de cimentación.

## 7.2 DESCRIPCION DEL TRABAJO DE CAMPO

La exploración de los suelos en Chuquibamba y Pampacolca se realizó mediante pozos a cielo abierto (calicatas) efectuadas dentro del área urbana. El número de excavaciones realizadas fue de siete en Chuquibamba y de once en Pampacolca.

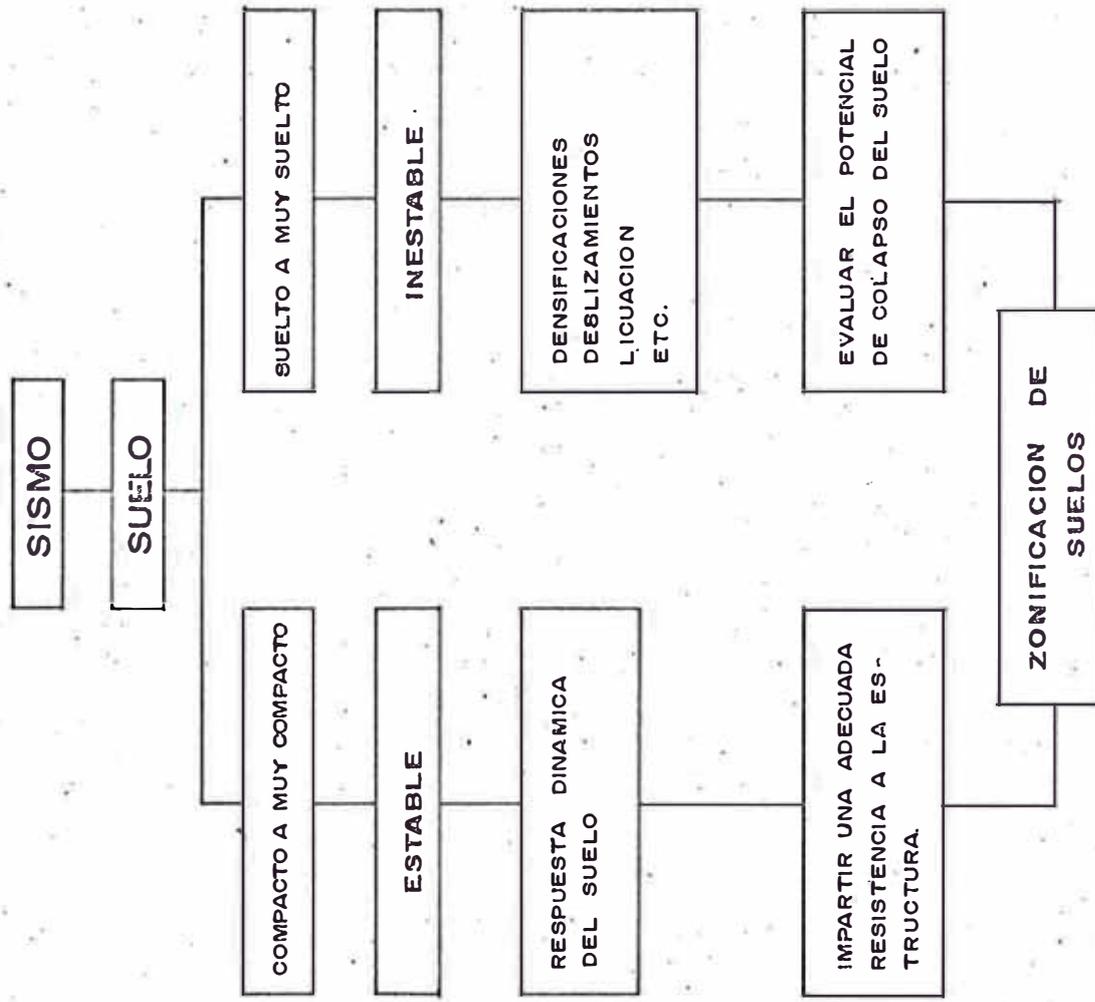


Fig. 7.1. Comportamiento dinámico de los suelos en sitio.

Cada excavación permitió observar las condiciones del suelo en forma cualitativa. Esta información se recoge en los perfiles estratigráficos que se encuentran en el Anexo 1. Adicionalmente se obtuvieron muestras alteradas para un posterior análisis y se realizó una prueba de densidad natural para estratos significativos.

Las características friccionantes de los suelos encontrados no justifican la obtención de muestras inalteradas, ya que el comportamiento de estos suelos es mejor evaluada mediante la densidad relativa.

### 7.3 PRUEBAS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio permitieron en primer lugar, la clasificación de las muestras mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para ello se realizaron los siguientes ensayos:

Análisis granulométrico por tamizado, norma ASTM D422 - 51.

Límites de consistencia, con la fracción de las muestras que pasa la malla N° 40.

Límite Líquido	NORMA	ASTM	D423 - 39
Límite Plástico	NORMA	ASTM	D424 - 39
Contenidos de Humedad	NORMA	ASTM	D 2216 - 63T

#### 7.3.1 Densidad Relativa

El estado de compacidad de los materiales friccionantes (de baja cohesión), puede evaluarse por medio de la densidad relativa.

La densidad relativa, expresada como un porcentaje, se define como el estado de compacidad de un suelo con respecto al menor y mayor estado de compacidad del mismo suelo, que pueda obtenerse en el laboratorio.

Expresada analíticamente:

$$Dr = \frac{e_o - e}{e_o - e_{\text{mín}}} \times 100$$

Donde:  $e_o$  = Relación de vacíos del suelo en su estado más suelto estable.

$e_{\text{mín}}$  = Relación de vacíos en el estado más denso pueda observarse en el laboratorio.

$e$  = relación de vacíos del suelo natural en el terreno.

La dificultad de obtener la densidad relativa con términos de relación de vacíos, obliga a calcularla usando expresiones de densidad como:

$$Dr = \frac{\gamma'_{\text{máx.}} (\gamma'_d - \gamma'_{\text{mín.}})}{\gamma'_d (\gamma'_{\text{máx.}} - \gamma'_{\text{mín.}})} \times 100$$

Donde:  $\gamma'_{\text{máx.}}$  = Densidad seca máxima obtenida en laboratorio.

$\gamma'_{\text{mín.}}$  = Densidad mínima seca en el laboratorio.

$\gamma'_d$  = Densidad natural seca.

Las densidades naturales in situ se obtuvieron empleando el método del cono de arena (NORMA ASTM - 1556).

La determinación de las densidades máximas y mínimas planteó las mayores dificultades. Por un lado, la densidad máxima (100% de la  $D_r$ ) se obtiene en suelos puramente friccionantes, por métodos vibratorios en vía húmeda o seca. El ensayo de densidad máxima se encuentra normalizado por el ASTM (NORMA D-2049-69); pero requiere de un equipo especial que no pudo conseguirse. Alternativamente se usó una adaptación del vibrador de mallas del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad para conseguir una adecuada compactación. Este aspecto ha sido tratado ampliamente por Orihuela (1981) en suelos de Arequipa. Para los suelos de Chuquibamba y Pampacolca los métodos de impacto (Proctor Modificado, NORMA ASTM D 698-70) dieron resultados mayores para la densidad máxima.

Por otro lado, la prueba para obtener la densidad mínima, suele hacerse por vertido en un recipiente de una muestra secada al horno. La norma ASTM 2049 que consiste en "rociar" el suelo con un embudo a la altura mínima de caída en forma uniforme, dentro de un recipiente de volumen conocido, tiene el inconveniente de requerir gran habilidad de parte del operador. Una alternativa al método que considerar una altura de caída constante por medio de un trípode que soporte al embudo. Esta variante dió resultados menores que el método original.

Se hace notar que la determinación de la densidad relativa, requiere de una normalización adecuada, pues los resultados que se obtengan dependen de los métodos usados en su determinación.

#### 7.4 CAPACIDAD DE CARGA DE LOS SUELOS

El análisis estático de los suelos, tiene por ob-

### **EQUIPO DE CAMPO**

GRAN PARTE DEL CUAL, ES DE FABRICACION ARTESANAL

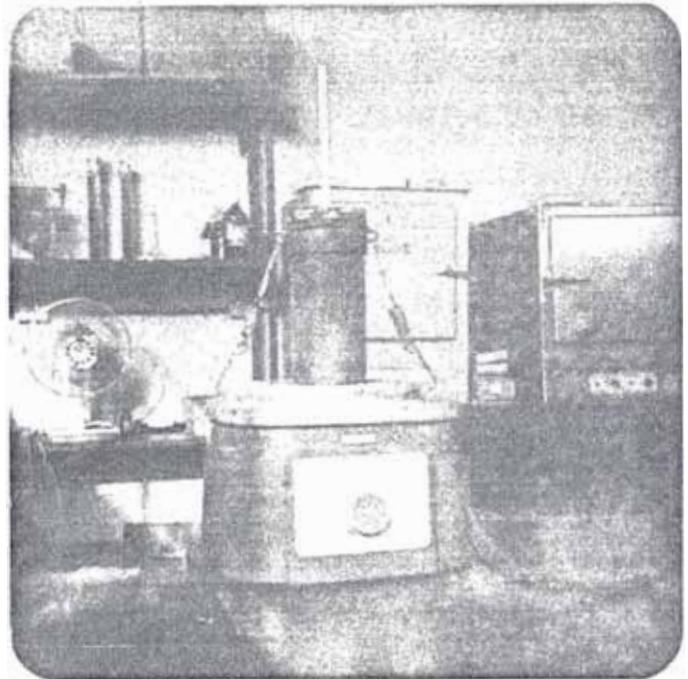
(8)



### **EQUIPO DE VIBRACION**

ADAPTACION DEL VIBRADOR DE MALLAS, CON UN MOLDE Y VARRILLA DE GRADUACION DE FABRICACION CASERA.

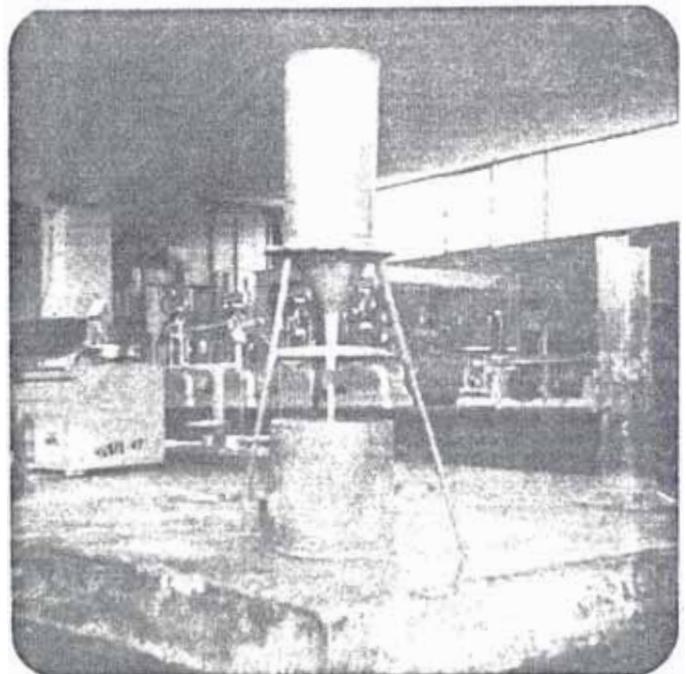
(9)



### **EQUIPO DE DENSIDAD MINIMA**

MOLDE, TRIPODE Y EMBUDO, CON ESPECIFICACIONES QUE ARROJAN LAS MINIMAS DENSIDADES REGISTRADAS.

(10)



jeto llegar a obtener la capacidad de carga de los suelos, es decir la presión que da lugar a la falla local por corte del suelo. Este parámetro es función del contenido de humedad, cohesión y ángulo de fricción interna.

Los suelos, como la mayoría de los materiales sólidos, rompen por tracción o por corte. Las tensiones de tracción pueden causar la abertura de grietas que bajo algunas circunstancias de importancia práctica, son dañinos; pero en la mayoría de los problemas de ingeniería sólo se considera la resistencia a la rotura.

La rotura por corte comienza en un punto de la masa del suelo, cuando en alguna superficie que pasa por dicho punto se alcanza una combinación crítica entre la tensión normal y la tangencial o de corte.

En la mecánica de suelos, la solución matemática de prácticamente todos los problemas de estabilidad va precedida de la determinación experimental de los valores  $C$  y  $\phi$  y con el subsecuente reemplazo del suelo real con un material plástico ideal al cual se le asignan los parámetros de corte  $C$  y  $\phi$ .

En cimentaciones superficiales, la capacidad de carga se evalúa por medio de la teoría de Terzaghi. De acuerdo a ella, la presión máxima ( $q_u$ ) que puede darse a un cimiento corrido por unidad de longitud sin provocar su falla es:

$$q_u = c N'_c + \gamma' D_f N'_q + \frac{1}{2} \gamma' B N'_\gamma$$

Donde los factores de capacidad de carga (elegidos para falla local), dependen sólo del ángulo de fricción

interna del suelo ( $\phi$ ); el cual a su vez depende directamente de la naturaleza de los granos y la compacidad relativa.

Para suelos friccionantes ( $c = 0, \phi \neq 0$ ) la expresión anterior queda reducida a:

$$q_u = \gamma' D_f N'_q + \frac{1}{2} \gamma' B N'_\gamma$$

Los factores de capacidad de carga debidos a la sobrecarga y al peso del suelo serán elegidos para la falla local.

La capacidad admisible o de trabajo ( $q_a$ ) se obtiene de dividir la carga última entre un factor de seguridad. Usualmente se toma un factor de seguridad de 2.

#### 7.4.1 Capacidad de Carga de los Suelos de Baja Cohesión - Encontrados

Los suelos de baja cohesión (friccionantes) son depósitos naturales de gravas, arenas, arenas limosas que pueden encontrarse en cualquier estado intermedio de compacidad, comprendido entre el suelto y el denso, dependiendo principalmente de la densidad relativa. El valor  $\phi$ , en estos casos, varía entre extremos bastante amplios.

La densidad relativa de la arena tiene un significado bien definido, ya que su valor es prácticamente independiente de la presión estática a que el material está sometido, dependiendo principalmente del procedimiento utilizado para sedimentarlo o compactarlo.

La densidad relativa ( $D_r$ ) de una arena es mucho más importante que cualquiera de sus otras propiedades, - excepto posiblemente su permeabilidad.

Cuanto mayor es el valor de la  $D_r$  hallada, más resistente será el suelo.

La densidad relativa de los estratos de arena - ejerce una influencia decisiva sobre el ángulo de fricción interna de la misma, consecuentemente, sobre su capacidad de carga y sobre el asentamiento de zapatas que descansan - en dicho material.

Del mismo modo, como la resistencia al corte de - estos suelos proviene de la trabazón entre granos, la forma de éstos y su distribución granulométrica, influyen sobre - el valor del ángulo de fricción interna. Los valores de  $\phi$  no se diferencian apreciablemente para el suelo seco o húme do.

Determinada la densidad relativa de un suelo, es posible encontrar el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) uti- lizando las relaciones deducidas en base a muchas experien- cias.

Estas relaciones, que se resúmen en el cuadro 7.1, toman en cuenta los valores, la densidad relativa expresa- da cuantitativamente y cualitativamente y los porcentajes del material que pasa la malla N° 200.

El valor de  $\phi$  obtenido de esta manera tiene - una aproximación de 5°.

CUADRO 7.1

Relación entre Dr y  $\phi$

Densidad Relativa %	Denominación	Angulo de Fricción Interna	
		Menos del 5% pasa la malla N° 200	Más del 5% pasa la malla N°200
0-15	Muy suelta	Menos de 29°	Menos de 27°
15-35	Suelta	29°- 33°	27° - 30°
35-65	Media	33°- 41°	30° - 35°
65-85	Compacta	41°- 46°	35° - 38°
85-100	Muy compacta	Más de 46°	Más de 38°

Finalmente la capacidad de carga de los suelos - estudiados, puede encontrarse aplicando la teoría de Terzaghi, utilizando los valores  $N'q$  y  $N'\gamma$  obtenidos en función del valor  $\phi$ .

## 7.5 ESTUDIO DE SUELOS EN CHUQUIBAMBA

### 7.5.1 Descripción de los Suelos Encontrados

El estudio de suelos en Chuquibamba se hizo en base a siete calicatas ejecutadas en el casco urbano. Del mismo modo se aprovecharon cortes de suelo, dentro de la población en la carretera que conduce a Cotahuasi y en la quebrada Huacucani, donde la erosión que producen los torrentes durante la época de lluvias, ha dejado al descubierto un amplio perfil. En esta quebrada puede notarse que -

por su naturaleza el suelo ofrece muy poca oposición a ser erosionado por el agua.

Geológicamente los suelos de Chuquibamba pertenecen al volcánico Sencca. Estos depósitos bastante potentes, están conformados por conglomerados poco consolidados envueltos en matrices areno limosas o areno arcillosas.

De acuerdo a lo observado, se notan diseminadas por la zona, brechas volcánicas formando grandes bloques - (ver fotografías) que debido al intemperismo se "desgran" y van a conformar el suelo. Estos bloques están compuestos por gravas angulosas livianas, cementadas en una matriz areno limosa que tiene, en ciertos casos, regular plasticidad.

Del mismo modo, se observan dentro del área grandes bloques de roca riolitica que inicialmente conformaban el relieve del antiplano, de acuerdo a la formación del relieve regional descrito en 5.2. Estas rocas se encuentran distribuidas en forma caótica, muchas de ellas cubriendo superficialmente a los rellenos granulares, y otras enterradas en forma parcial. En muchos casos los pobladores, ante la imposibilidad de sacarlas de su lugar, las han utilizado para cimentar sus viviendas sobre ellas. Debe hacerse notar, sin embargo, que por tratarse de bloques aislados y subrepuestos, esta medida puede ser perjudicial.

#### 7.5.2 Ensayos Realizados

Las calicatas efectuadas, cuya ubicación puede verse en la figura 7.2, permitieron observar las características de los suelos y establecer los perfiles estrati-

gráficos que se pueden ver en el anexo 1.

En ninguna de las excavaciones se encontró el nivel freático, de modo que estos suelos no están sometidos a condiciones de saturación.

Es importante anotar la dificultad que se tuvo - al realizar las excavaciones, por la cantidad de piedras - encontradas y por las características de regular compacidad que presenta el suelo.

Las pruebas de laboratorio, sobre muestras alteradas obtenidas, permitieron clasificar los suelos de acuerdo a la clasificación Unificada de Suelos (SUCS). El cuadro 7.2 resume las características granulométricas y la respectiva clasificación SUCS.

Las características friccionantes de los suelos permiten evaluar su estado de compacidad por medio de la densidad relativa. Este parámetro descrito en 7.3.1 permite así mismo estimar el ángulo de fricción interna y la capacidad portante de los suelos.

En el cuadro 7.3 se encuentran los valores de densidad relativa obtenidos para los suelos ensayados. El ángulo de fricción interna se ha deducido en base al cuadro 7.1.

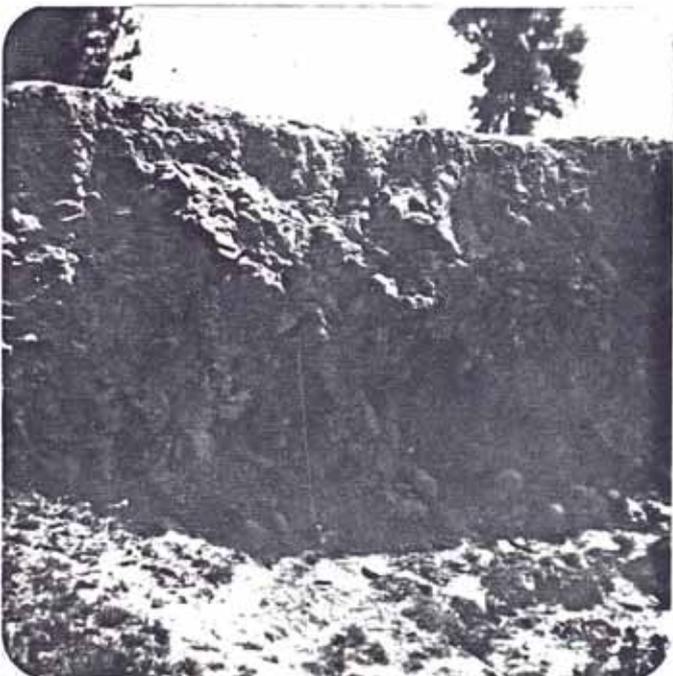
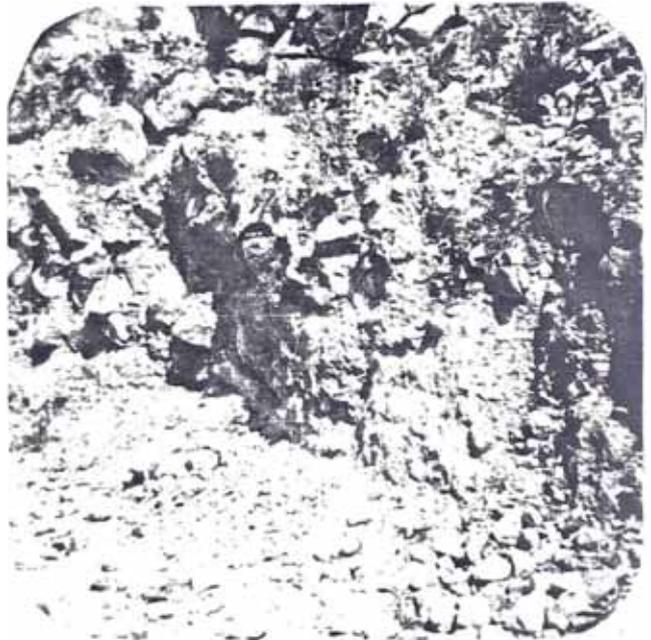
En general, los suelos de Chuquibamba pueden clasificarse como suelos granulares del tipo de gravas bien graduadas, pobremente graduadas y arenas pobremente graduadas, algo limosas en muchos casos. La distribución espacial de estos suelos no puede definirse exactamente, porque de acuerdo a la exploración realizada, aparecen entrelazados erráticamente.

## SUELOS DE CHUQUIBAMBA



Bloque de brecha volcánica conformada por cantos angulosos cementados en una matriz areno limosa compacta.

Perfil de suelo en la parte céntrica de Chuquibamba. Se observa que los suelos son arenos limosos con gran cantidad de piedras de diversos tamaños.



Corte de suelo en el Barrio Belén. Puede notarse que la naturaleza no varía apreciablemente respecto a los perfiles anteriores.

CUADRO 7.2

CARACTERISTICAS GRANULOMETRICAS DE LOS SUELOS DE CHUQUIBAMBA

% Acumulado en peso que pasa							
POZO (PE)	1	2	3	4	5	6	7
MUESTRA	M-1						
PROFUNDIDAD (m)	0.00 3.00	0.00 2.50	0.50 1.60	0.00 3.20	0.30 1.50	0.80 1.80	0.00 1.60
Malla 3"	100	100	100				
2"	88	79	78	100			100
1 1/2"	88	79	71	90	100		96
1"	80	58	68	87	97	100	85
3/4"	75	54	66	81	91	97	82
1/2"	-	-	-	-	87	92	73
3/8"	64	37	63	59	83	88	64
1/4"	60	31	61	49	79	82	55
Nº 4	57	27	58	43	74	76	49
10	52	20	42	32	63	60	34
40	30	10	17	20	41	33	13
50	22	8	13	17	35	26	9
60	14	5	7	11	15	15	4
100	11	4	5	9	7	11	3
200	4	2	1	4	2	3	1
W %	2.4	5.6	9.8	3.2	24.3	12.6	15.0
CLASIF. (SUCS)	SP	GP	SP	GW	SP	SP	GP

CUADRO 7.3

CARACTERISTICAS DE COMPACTACION DE LOS SUELOS DE CHUQUIBAMBA

EXCAV.	MUEST.	PROF.	$\gamma_d$	$\gamma_{m\acute{a}x.}$	$\gamma_{m\acute{i}n.}$	Dr (%)	$\phi$	ESTADO DE COMPACTACION
PZ-1	M1	3.00	1.62	1.79	1.32	70	36°	Compacta
PZ-2	M1	2.40	1.68	1.80	1.51	63	33°	Media
PZ-3	M1	1.60	1.65	1.86	1.36	65	35°	Compacta
PZ-4	M1	3.00	1.63	1.85	1.39	60	34°	Media
PZ-5	M1	1.40	1.27	1.80	1.19	20	28°	Suelta
PZ-6	M1	1.80	1.76	1.90	1.49	71	36°	Compacta
PZ-7	M1	1.60	1.64	1.74	1.41	74	36°	Compacta

Sin embargo, se propone una zonificación de suelos para el área urbana de Chuquibamba, que puede verse en la figura 7.2. Esta zonificación ha sido establecida considerando la predominancia del tipo de suelo para cada zona, en base a las excavaciones realizadas y a cortes de suelo existentes en el área.

Los resultados dados en el cuadro 7.3, demuestran que los suelos de Chuquibamba tienen compacidades relativas comprendidas entre medianamente compactas y compactas. Estas características son consideradas buenas para depósitos de suelo en situación estable que no es precisamente la condición de los suelos de Chuquibamba.

Como se indicó en 5.1, Chuquibamba presenta condiciones topográficas y geomorfológicas favorables a la inestabilidad de estos depósitos, de manera que la zonificación de suelos debe incluir necesariamente condiciones particulares de estos suelos relacionados fundamentalmente a su configuración topográfica. Se tiene por ejemplo la zona 1 (Z - 1), conformada por suelos granulares GW, GP, SP compactos y secos de configuración relativamente plana, donde los suelos pueden considerarse como estables. Esta zona - está ocupada actualmente por las viviendas más antiguas, - obviamente las primeras en establecerse.

Adicionalmente, se ha denominado como Zona 1 (Z-1) a un área ubicada al Este de la descrita anteriormente, que presenta condiciones similares y que actualmente está ocupada por terrenos de cultivo, esta zona es reservada como probable zona de expansión urbana.

Circunscribiendo el área antigua de la ciudad (z - 1) se encuentran los terrenos con pendientes, que

abruptamente pasan de ser moderadas a fuertes. Se tiene - la zona 2 (Z - 2) que conforma la ladera izquierda de la - quebrada Huacucani, donde se evidencia una fuerte inestabilidad de taludes y la zona 3 (Z - 3) conformada por suelos más limosos, también de fuerte pendiente que a diferencia de la zona 2 se observa algo más estable.

La Zona 4 (Z - 4), esta conformada por una área de rellenos artificiales poco potentes, de acuerdo a las - observaciones de cortes y pozos explorados. Esta área tiene pendientes leves.

Teniendo en cuenta que en las laderas de la quebrada Huacucani (Z - 2) están cimentadas muchas viviendas, es importante examinar la estabilidad de estos taludes naturales.

### 7.5.3 Estabilidad de Taludes

De acuerdo a las observaciones realizadas, las laderas de la quebrada Huacucani presentan las condiciones de estabilidad más desfavorables. En este acápite se trata de examinar la estabilidad de estas laderas.

La quebrada Huacucani constituye un curso de agua estacional, como tal, durante la época de lluvias se caracteriza por llevar grandes caudales instantáneos que - provocan graves erosiones en el pie de los taludes y en algunos casos pequeños deslizamientos inmediatos.

La acción de un sismo en un talud potencialmente deslizable por este fenómeno se trata de estudiar.

Durante la estadía en Chuquibamba, pocos meses -

después de ocurrido el sismo del 16.02.79, se constató el inicio de un deslizamiento considerable de una porción de la ladera que da a la quebrada. La evidencia fue una grieta superior que discurre paralela al curso de la quebrada y viene a constituir el límite superior de la superficie de falla. Esta grieta comprometió estructuralmente a varias viviendas ubicadas en la zona, de modo que los muros de éstas, orientados perpendicularmente a la supuesta superficie de falla sufrieron daños por tracción en su plano.

Las observaciones anotadas anteriormente, sirven para establecer a priori un plano de falla, el punto superior se ha hecho coincidente con la grieta observada y el punto inferior se ha tomado en el pie del talud.

El estudio de estabilidad se orienta a calcular un factor de seguridad al deslizamiento.

Durante un terremoto se supone una modificación del cálculo en equilibrio límite convencional para incluir una fuerza sísmica. Esta fuerza es proporcional al peso de la masa potencialmente deslizante multiplicada por un coeficiente sísmico  $A'$  que está relacionado en cierta forma con la aceleración del terreno subyacente. Se exige que el talud posea un factor de seguridad igual como mínimo a la unidad bajo los efectos combinados del peso  $W$  y la fuerza sísmica  $A' W$ .

Para el caso analizado se han considerado coeficientes sísmicos  $A'$  de 0.2 y 0.3. El suelo se ha tomado con cohesión nula y con un ángulo de fricción interna de  $35^\circ$  como valor promedio para suelos en el área.

El análisis se muestra en la figura 7.3 (para un coeficiente sísmico de 0.3 solamente). Los factores de seguridad calculados resultaron ser de 1.38 y 1.10 para coeficientes sísmicos de 0.2 y 0.3 respectivamente.

El análisis revela que la zona es potencialmente deslizable para coeficientes mayores de 0.3. En vista de que la sección considerada es relativamente amplia, los deslizamientos pueden producirse en secciones más reducidas, es decir para planos de falla cuyos puntos superiores tengan una cota más baja.

Como la erosión del pie de los taludes constituye una acción constante, cualquier análisis, como el realizado anteriormente, es transitorio y obviamente los factores de seguridad para situaciones posteriores serán más críticos. Estas son las razones para establecer la zona 2 como potencialmente deslizable y no recomendable para establecer edificaciones, como las actualmente existentes.

#### 7.5.4 Capacidad de Carga de los Suelos de Chuquibamba

La capacidad de carga de los suelos de Chuquibamba puede calcularse por medio de los parámetros encontrados anteriormente.

Este valor es referencial, sufre modificaciones - al considerar un mayor ancho al cimiento corrido y/o al modificar la profundidad de cimentación. Actualmente las viviendas se construyen sobre cimientos corridos de anchos que fluctúan entre 0.60 y 0.80 m. de ancho y profundidades menores de 1.00 m. Para estas condiciones y tomando en cuenta parámetros promedios de las características de los suelos del área son  $\gamma_d = 1600 \text{ Kg/m}^3$   $\phi = 35^\circ$  y coeficien

tes para falla local, la capacidad admisible del suelo considerando un factor de seguridad de 2 resulta ser igual a - 1.40 Kg/cm<sup>2</sup>.

## 7.6 ESTUDIO DE SUELOS EN PAMPACOLCA

### 7.6.1 Descripción de los Suelos Encontrados

El estudio de suelos para el área urbana de Pampacolca, tuvo un programa de trabajo similar al realizado en Chuquibamba. La exploración de campo fue posible con las once calicatas ubicadas en áreas convenientemente elegidas, y algunos cortes de suelo existentes, que permitieron observar las características del suelo.

Geológicamente, los suelos de Pampacolca son depósitos de origen glaciario y fluvio aluvial, de acuerdo al origen del valle descrito anteriormente en 6.2. La potencia de estos depósitos está estimada en 250 a 300 metros - que pueden observarse íntegramente en el cauce labrado por el río Llato, que ha dejado suspendida a la planicie de Pampacolca.

Los suelos de Pampacolca se caracterizan por estar conformados de arenas limosas que envuelven cantos angulosos de tamaño pequeño. Adicionalmente se encuentran lentes erráticos de arenas limpias y/o gravas. Esto último ocurre en las inmediaciones de los cursos de agua que discurren por la población, vale decir el río Chilincay y la acequia de regantes.

### 7.6.2 Ensayos Realizados

Las calicatas efectuadas, cuya ubicación puede -

verse en la figura 7.4, permitieron observar las características cualitativas de los suelos y establecer los perfiles estratigráficos que se encuentran en el anexo 1 (ver fotografías).

Los ensayos sobre las muestras alteradas, extraídas de cada calicata, fueron los mismos utilizados para el caso de los suelos de Chuquibamba. En base a ellos se logra, en primer lugar, clasificar las muestras utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Además se tomaron pruebas de densidad natural in situ, sobre estratos significativos, para evaluar posteriormente las densidades relativas.

Las excavaciones tuvieron una profundidad máxima de 3 metros. El nivel freático no fue encontrado hasta este nivel, por lo que las humedades observadas, corresponden a filtraciones de agua superficial.

De acuerdo a referencias de lugareños, excavaciones realizadas por ellos para establecer silos sanitarios, que han llegado a más de 20 metros, revelan que no existen variaciones significativas en la estratigrafía del suelo; vale decir, la alternancia de suelos arenos limosos, gravas y arenas se mantiene. Estas versiones, agregan que fue notable el incremento de la compactación de los materiales encontrados a medida que la excavación se profundizaba. Las excavaciones referidas fueron realizadas en las inmediaciones del PZ-1 (Fig. 7.4).

El cuadro 7.4 resume las características granulométricas de los suelos de Pampacolca y su respectiva clasificación SUCS. Es notable, el predominio de arenas-limosas-arcillosas (SM, SC), arenas pobremente graduadas (SP), gra

CUADRO 7.4

CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DE LOS SUELOS DE PAMPACOLCA

\* Acumulado que Pasa la Malla

SONDEO	PZ-1		PZ-2	PZ-3	PZ-4	PZ-5	PZ-6	PZ-7		PZ-8	PZ-9	PZ-10	PZ-11
	M1	M2						M1	M2				
MUESTRA			M1	M1	M1	M1	M1	M1	M2	M1	M1	M1	M1
PROF. (m.)	0.80 1.55	1.55 1.75	1.10 2.00	1.10 2.50	1.10 1.80	1.75 2.35	1.05 1.65	1.30 1.90	0.50 1.30	1.25 1.95	1.40 1.70	0.00 2.70	1.25 2.05
Malla													
1			96			95		87			91		
1/2"			80			89	98	68			83	93	86
1"			71		97	86	97	55		99	68	90	86
3/4"			62	99	95	82	94	47	90	97	59	89	86
1/2"			56	99	92	79	92	39	85	96	47	84	85
3/8"			50	98	90	75	89	31	83	94	41	81	85
1/4"			47	97	88	73	86	26	78	91	36	77	85
Nº			40	95	83	66	79	16	69	86	33	73	84
4			31	86	76	49	66	8	56	74	27	66	82
8			23	82	68	36	54	5	45	64	18	54	74
20			18	76	63	30	49	3	37	57	9	43	64
40			12	59	55	24	39	2	20	46	5	37	59
50			11	54	51	22	35	2	12	43	2	27	52
80			6	40	39	18	26	1	4	32	2	25	47
100											0	14	34
200													
W(%)	11.0	12.4	6.20	16.6	11.0	10.6	13.2	5.8	-	11.8	3.4	12.2	7.6
SUCS	SP-SM	SM	GP-GM	SM	SM-SC	SM	SM-SC	GW	SP	SC	GW	SC	SM-SC

vas graduadas (GW) y pobremente graduadas limosas (GP, GM) en orden de importancia.

El estado de compacidad de estos materiales, fue evaluado también por medio de la densidad relativa.

El cuadro 7.5 contiene estas características, la compacidad es expresada tanto cuantitativa como cualitativamente. El ángulo de fricción interna se ha deducido de relaciones empíricas incluídas en el cuadro 7.1.

A diferencia de Chuquibamba, los suelos de Pampacolca, por su configuración topográfica y condiciones generales, pueden considerarse estables. Pampacolca está asentada, como se anotó en su oportunidad, sobre un valle amplio relativamente plano, con una ligera inclinación al SE, no significativa para provocar inestabilidad de suelos como es el caso de Chuquibamba.

Del mismo modo, los suelos de Pampacolca tienen compacidades relativas bastante diferenciadas. Se tienen estados de compacidad que varían desde muy sueltos a muy compactos, entre puntos relativamente próximos.

La figura 7.4 es una zonificación de suelos para Pampacolca, tomando en cuenta la predominancia de los materiales encontrados en las excavaciones.

La zona 1 (Z-1), la más amplia de todas, abarca una franja que incluye las áreas de mayor densidad de edificaciones. Los suelos que la conforman, son areno limosos y areno arcillosos con densidades relativas comprendidas entre 13 y 72%. Se puede notar de acuerdo al cuadro 7.5 - que dentro de esta zona las densidades relativas más bajas

CUADRO 7.5

CARACTERISTICAS DE COMPACTAD DE LOS SUELOS DE PAMPACOLCA

ESCAV.	MUESTRA	PROF.	$\gamma_d$	$\gamma_{\text{Máx.}}$	$\gamma_{\text{Mín.}}$	Dr (%)	$\phi$	ESTADO DE COMPACTAD
PZ-1	M1	1.25	1.43	1.88	1.38	13	27°	Muy suelta
	M2	1.80	1.47	1.95	1.21	46	32°	Media
PZ-2	M1	1.70	1.78	2.09	1.44	61	34°	Media
PZ-3	M1	1.20	1.60	1.97	1.17	66	35°	Compacta
PZ-4	M1	1.90	1.42	1.99	1.25	32	30°	Suelta
PZ-5	M1	2.35	1.85	2.15	1.36	72	36°	Compacta
PZ-6	M1	1.65	1.60	2.12	1.26	52	33°	Media
PZ-7	M1	1.90	2.20	2.06	1.51	94	49°	Muy compacta
PZ-8	M1	1.95	1.52	2.03	1.26	45	32°	Media
PZ-9	M1	1.70	1.79	1.97	1.43	74	44°	Compacta
PZ-10	M1	2.70	1.36	1.96	1.29	15	27°	Muy suelta
PZ-11	M1	2.05	1.53	1.88	1.18	61	34°	Media

## SUELOS DE PAMPACOLCA

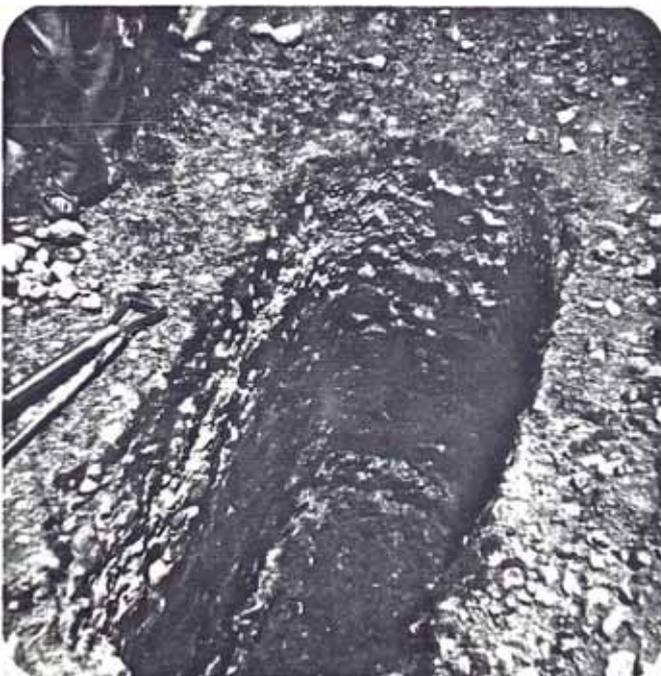
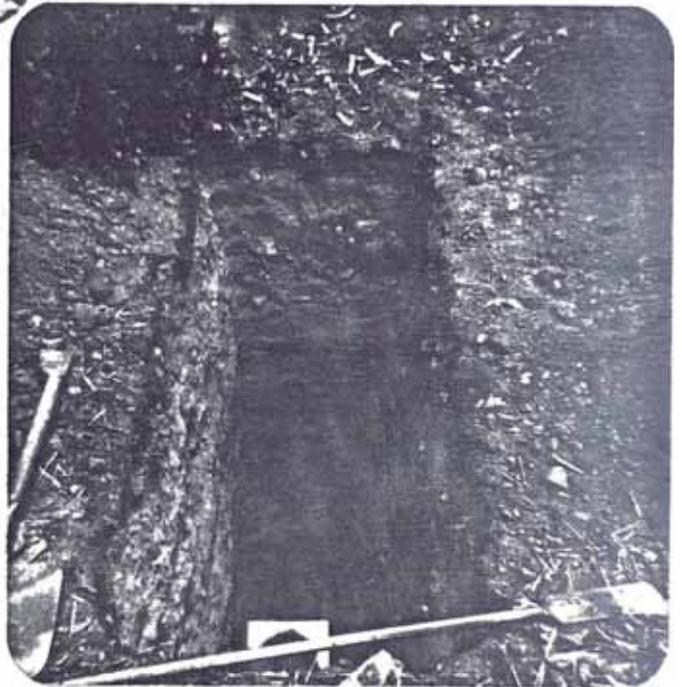


POZO PZ-3

Toma de densidad in situ sobre el estrato de arena limosa compacta, por medio del cono de arena. El estrato superior lo conforma una grava arenosa.

POZO PZ-4

Perfil conformado predominantemente por arenas limosas con lentes pequeños de arenas finas.



POZO PZ-7

Se observa superficialmente un estrato de grava mal graduada, luego arenas pobremente graduadas y al fondo gravas bien graduadas.

corresponden a las excavaciones PZ - 1, PZ -4 y PZ-8 que están ubicadas en cotas más bajas. La densidad relativa, asimismo, se incrementa en las excavaciones PZ-2, PZ-3, PZ-5 y PZ-6, ubicadas en cotas más altas.

Circunscribiendo a la zona 1, se dispone la zona 2 (Z-2) conformada por suelos areno limosos que intercalan importantes estratos de gravas bien graduadas y/o arenas pobremente graduadas. La diferenciación respecto a los suelos de la zona 1, se ha hecho fundamentalmente, tomando en cuenta ese factor. Los valores de densidad relativa obtenidos para esta zona son significativamente superiores, es más para el PZ-7 el valor de  $D_r = 94\%$  es el máximo encontrado.

Por otro lado, la zona 3 (Z-3) es una área más o menos amplia de rellenos artificiales de bastante potencia. La excavación PZ-10 de casi 3 m. de profundidad ubicada en este sector, no llegó a tocar terreno natural.

Las densidades relativas para estos rellenos de apenas 11%, revelan el estado tan suelto en que se encuentran.

La delimitación de estos rellenos es bastante aproximada y estuvo basada en la observación de zanjas existentes en el área.

Al este de la población, se encuentra una zona poco poblada, que presenta características similares a la zona 1, por lo que se la ha denominado de igual manera. En esta zona se encuentra la excavación PZ-11.

De acuerdo a lo observado, las condiciones general

les de los suelos de Pampacolca, pueden considerarse como estables, y que el comportamiento de estos depósitos ante un sismo es adecuado, en el sentido que no sufren alteraciones significativas que podrían provocar fallas directas en las cimentaciones. Debe hacerse solamente esta salvedad, para el ámbito de la zona 3 cuyas condiciones de compactidad la hacen peligrosa.

### 7.6.3 Capacidad de Carga de los Suelos de Pampacolca

Para valores medios de las características de los suelos de Pampacolca, encontramos anteriormente, y considerando condiciones conservadoras se puede proporcionar un valor referencial de capacidad de carga de estos suelos. Las características promedias asumidas son:  $\gamma' = 1660 \text{ Kg/m}^3$   
 $\phi = 36^\circ$  y factores de carga para falla local.

La capacidad de carga admisible, considerando un factor de seguridad igual a 2 resulta ser de  $1.65 \text{ Kg/cm}^2$ .

## C A P I T U L O   V I I I

### ESTUDIO DE DAÑOS POR EL SISMO DEL 16/02/79

#### 8.1 GENERALIDADES

El estudio de daños en las construcciones de Chuquibamba y Pampacolca permitió la apreciación de los efectos producidos por el sismo, particularmente las fallas en las construcciones, la distribución de daños en las zonas urbanas y al mismo tiempo evaluar las condiciones estructurales de las edificaciones existentes, el estado de la construcción y la técnica constructiva.

Con este objeto se realizaron encuestas en gran número de construcciones, casi en su totalidad viviendas, utilizando formularios especialmente diseñados para el efecto. Estos formatos han tratado de resumir las características más importantes a tomarse en cuenta. En el anexo se muestra un modelo del formulario usado.

En la información recogida por las encuestas, - se incluyeron gráficos de plantas cortes y fallas observadas. El procesamiento de la información, en una etapa posterior, consistió en evaluar el grado de daño por medio de una escala convencional y sacar conclusiones con respecto a las observaciones anotadas.

## 8.2 ESCALA DE EVALUACION DE DAÑOS

La escala de evaluación usada, fue la MSK versión IGP (1979) empleada por sus autores Medredev, Sonheuer y Karnik en la zonificación de Moscú en 1968.

La escala, en primer lugar, plantea una clasificación de estructuras de acuerdo a características de materiales y estructuración, posteriormente establece grados de daño de 1 a 4 de acuerdo a los efectos que se observen en las estructuras. A continuación se describe:

### ESCALA M.S.K.

#### TIPOS DE ESTRUCTURAS (Excluye estructuras sismo-resistentes)

Tipo A Bloques de piedra sin trabar, piedras y barro como mortero, adobes. Canto rodado y barro - (formando hormigones), tapial ordinario, piedra asentada con trabazones, ladrillo de teja asentada con mortero pobre.

Tipo B Contrucciones de ladrillo sin reforzar y de bloques prefabricados, construcciones de sillar o piedra natural cortada. Estructura de Pilares de concreto o acero.

Tipo C : Edificios reforzados con elementos dúctiles, de acero o de concreto armado. Estructuras de concreto y acero de nudos soldados o empernados sin consideración especial de simetría. Casas de madera bien diseñadas.

#### CLASIFICACION DE LOS DAÑOS

Clase 1 : Daños Leves

Fisuras en los revestimientos, caídas de pequeños trozos de revoque.

Clase 2 : Daños Moderados

Grietas pequeñas en los muros, caída de grandes trozos de revoque, caída de parapetos, grietas en las chimeneas e incluso derrumbamientos parciales de las mismas.

Clase 3 : Daños Severos

Grietas grandes y profundas en los muros, caída de chimeneas.

Clase 4 : Destrucción Parcial

Brechas y grietas en los muros, derrumbamiento parcial de los edificios, agrietamiento entre distintas partes o secciones de las construcciones, desmoronamiento (colapso) de paredes interiores y muros.

Clase 5 : Colapso

Destrucción total de las construcciones o de sus partes vitales.

Como puede notarse, la clasificación de daños - trata de ser suficientemente explícita, sin embargo, la práctica demostró que la naturaleza subjetiva de apreciación del daño es difícil de eliminar. Por este motivo, se precisó de un afinamiento en base a longitudes y espesores de grietas que permite ampliar la escala a grados - intermedios tales como: "menor", "igual" y "mayor". El cuadro 8.1, muestra los rangos de afinamiento sugeridos - que fueron usados en la evaluación.

CUADRO 8.1

DAÑO CLASE	GRIETA		AFINAMIENTO		
	ESPESOR	LONGI-TUD	MENOR	IGUAL	MAYOR
1	2mm	0.5m	1/2mm	1/2-1mm	1-2mm
2	2-5mm	1.5m	2-3mm	3-4mm	4-5mm
3	1/2-2cm	1.5m	0.5-1cm	1-1.5cm	1.5-2cm
4 *	2cm	1.5m			

\* DERRUMBE PARCIAL.

### 8.3 CONSTRUCCIONES EXISTENTES EN LA ZONA

El material predominante en las construcciones de Chuquibamba y Pampacolca es el adobe. Existen, sin embargo

casos específicos de utilización de otros materiales, como el concreto armado y la albañilería de ladrillo en los locales públicos más importantes y en contadísimas viviendas.

Esta discriminación, obedece a factores económicos pues materiales como el cemento, ladrillo y agregados tienen precios prohibitivos dentro de la zona.

La evaluación de daños fue realizada, en consecuencia, sobre construcciones de adobe, básicamente viviendas. Se han incluido dentro de ellas, las construcciones de tapial y piedra asentada con barro, que representan un pequenísimo porcentaje. Todas las estructuras involucradas en la evaluación corresponden al tipo A de la escala MSK anteriormente descrita.

Un factor importante a consignar en la evaluación, resulta ser la antigüedad de la construcción. En primer lugar, el daño evaluado en construcciones antiguas es el resultado de la acumulación de efectos de varios sismos anteriores a los cuales fue sometida la estructura, - por tal razón es importante, aunque difícil, realizar un "filtrado" de los daños anteriores con los daños ocasionados directamente por el sismo en cuestión. La antigüedad en segundo lugar, está ligada a determinada técnica constructiva, de manera que se observan ciertos criterios en la estructuración y detalles especiales en la construcción de acuerdo a la época.

La evolución de la técnica constructiva permite apreciar la experiencia que han dejado los sismos para - corregir los defectos en las construcciones.

Una desventaja importante que tiene el adobe

como material, además de sus malas características mecánicas, es el deterioro que sufre con el paso del tiempo. Este desgaste se manifiesta por un "desgranamiento" de las unidades y se produce por los frecuentes cambios volumétricos de los elementos que conforman el adobe, fundamentalmente los arcillosos. En este sentido, la humedad del ambiente juega un rol muy importante y en los casos de Chuquebamba y Pampacolca, caracterizados por ser de clima seco, permite tener construcciones de adobe de más de 100 años en buenas condiciones.

#### 8.4 EVALUACION DE DAÑOS

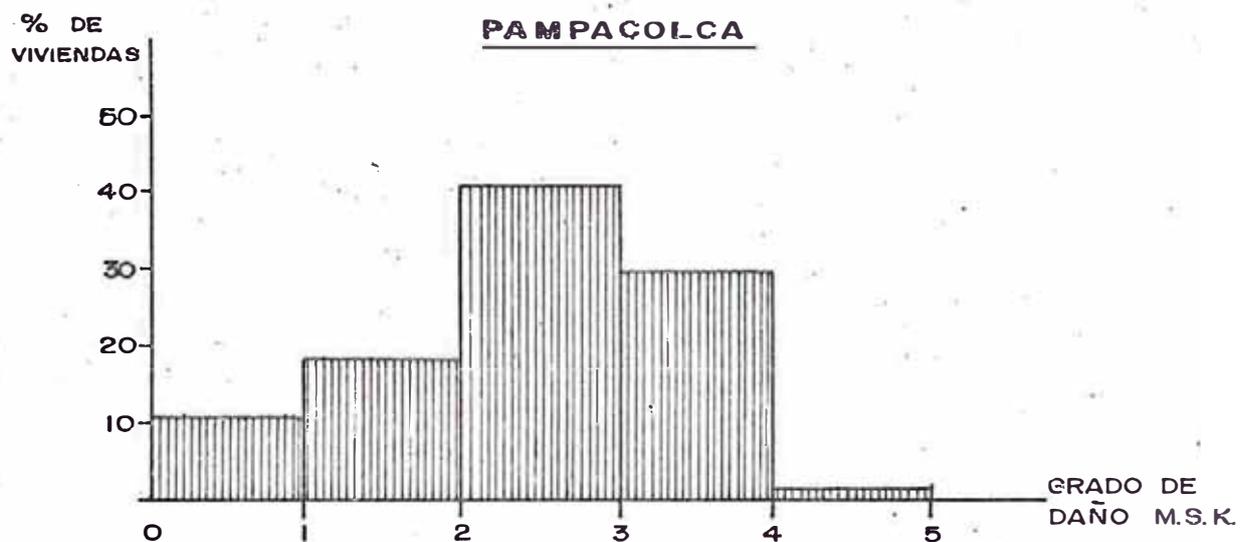
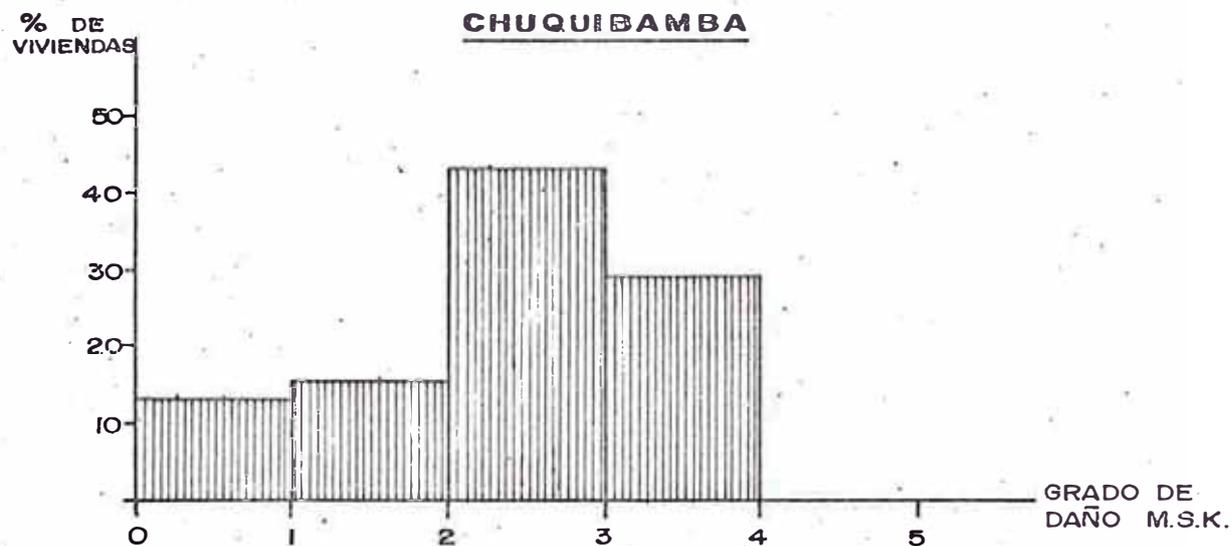
##### 8.4.1 Frecuencia de Daños y Fallas Más comunes Observadas

El número de construcciones evaluadas fue de 118 en Chuquibamba y 238 en Pampacolca. En general puede afirmarse que todas las viviendas evaluadas sufrieron algún grado de daño MSK, es decir todas manifestaron efectos por el sismo del 16/02/79

La frecuencia de daños encontradas son muy similares para ambas localidades (véase Fig. 8.1). El pico más pronunciado corresponde al rango de daño 2-3 MSK, con 43% y 40% de viviendas dañadas para Chuquibamba y Pampacolca respectivamente.

El rango de daños entre 3 y 4 MSK tiene una frecuencia también similar para las dos localidades y fluctúa entre el 30%. Para el rango mayor de 4 la frecuencia es cero en Chuquibamba y de 1% en Pampacolca que corresponde a 3 viviendas que colapsaron por motivos que serán expuestos más adelante.

FRECUENCIA DE DAÑOS EN VIVIENDAS DE ADOBE  
SISMO DEL 16/02/79



GRADO DE DAÑO M.S.K.	% DE VIVIENDAS DAÑADAS	
	CHUQUIBAMBA	PAMPACOLCA
0-1	13	11
1-2	15	18
2-3	43	40
3-4	29	30
+4	-	1

Fig. 8.1

El hecho que todas las viviendas consideradas - fueran dañadas, demuestra la alta sensibilidad del adobe ante una sollicitación sísmica.

Como es conocido, el adobe presenta una pobre - resistencia a esfuerzos de flexión y corte y por tal motivo es imprescindible tomar en cuenta ciertos criterios en la estructuración y construcción de la vivienda.

En cuanto a las fallas más frecuentes que se han observado en las construcciones de adobe, destacan en orden de importancia las siguientes:

- a) Falla de Tracción.- Observada en los encuentros de - muros, generalmente en las esquinas. Se debe a los - esfuerzos de tracción directa que se genera en uno de los muros al dar arriostre lateral a otros muros de - encuentro.
- b) Falla de Flexión.- Producida cuando el muro actúa como una losa apoyada en su base y en los elementos verticales que lo arriostran. En este caso son notables las grietas que siguen las hipotéticas líneas de fluencia de acuerdo a las condiciones de apoyo.
- c) Falla por Corte.- Se produce cuando el muro trabaja como muro de corte, se debe principalmente a los esfuerzos tangenciales en las juntas horizontales.

Las construcciones con daños entre 3 y 4 MSK - presentan por lo general fallas por tracción localizadas en las esquinas. Esta falla es muy frecuente en el adobe y es más notable en las construcciones que no tienen elementos de amarre a nivel de techo (viga collar o arriostre en el encuentro de muros).

La falla por flexión se ha observado en algunas construcciones que tenían muros muy largos. La falla por corte es la menos frecuente y sólo se observó en casos de asentamientos diferenciales del terreno en Chuquibamba.

#### 8.4.2 Daños en Chuquibamba

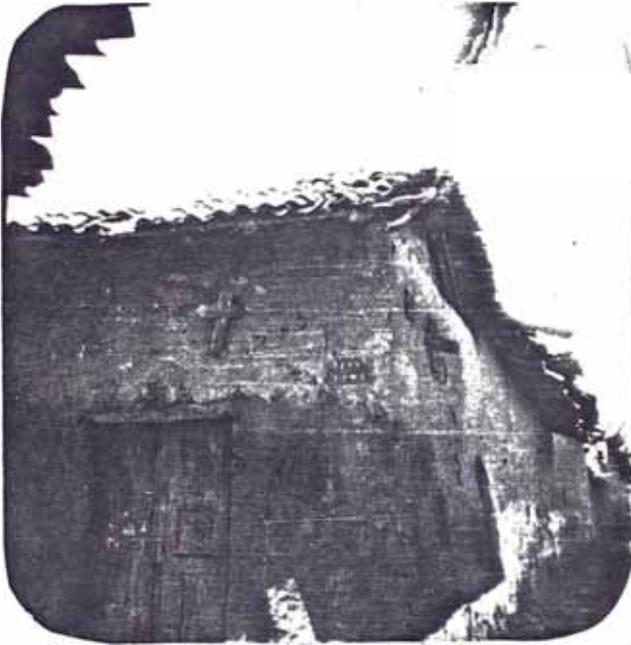
Las construcciones de Chuquibamba son en general bastante antiguas. La zona céntrica de la ciudad que ocupa el área de topografía menos accidentada, tiene construcciones que superan los 100 años de construídas y todavía son utilizadas. Bordeando esta área se encuentran las construcciones más recientes, que fueron construídas hacia 1960 (después del terremoto que devastó Chuquibamba) y que en muchos casos ocupan zonas de topografía muy accidentada (Barrio Belén, zona de la Plaza de Toros principalmente).

La figura 8.2 muestra la distribución de daños - en las construcciones de adobe en Chuquibamba. Puede notarse la acumulación de grados altos de daño en la zona céntrica de la ciudad, donde el efecto de sucesivos terremotos es evidente.

La zona Norte de la ciudad, también presenta un alto grado de daño debido a la excesiva pendiente del terreno sobre el cual están edificadas las viviendas. Un hecho similar se aprecia en las viviendas que dan a la quebrada Huacucani, donde los daños fluctúan entre 3 y 4 MSK. En este último caso pudo observarse una grieta en el terreno correspondiente al punto superior del plano de falla del talud, indicio de un deslizamiento potencial, - que comprometió estructuralmente a varias viviendas.

En el resto del área se presentan daños de gra-

## CONSTRUCCIONES DE ADOBE EN CHUQUIBAMBA



Vivienda de más de 100 años de construída. Se observan arriostres de madera en el enouentro de muros.

Falla típica en esquina. La construcción está sobre terreno con fuerte pendiente.



Caída parcial de una construcción antigua. Obsérvese el espesor de los muros.



dos variados, predominando los menores. Se observa en todos los casos que la topografía influye en forma muy importante, por cuanto los daños se acentúan en las zonas de fuertes pendientes.

#### 8.4.3 Daños en Pampacolca

Los daños en construcciones de adobe en Pampacolca, fueron evaluados en igual forma que en Chuquibamba.

Las construcciones de Pampacolca, a semejanza de las de Chuquibamba, son en muchos casos muy antiguas.

En la figura 8.3 se representa la distribución de daños en Pampacolca. Puede notarse dos zonas de acumulación de daños altos. Una de ellas es la zona pegada al riachuelo o acequia de regantes cuyas calles presentan pendientes pronunciadas en ciertos tramos.

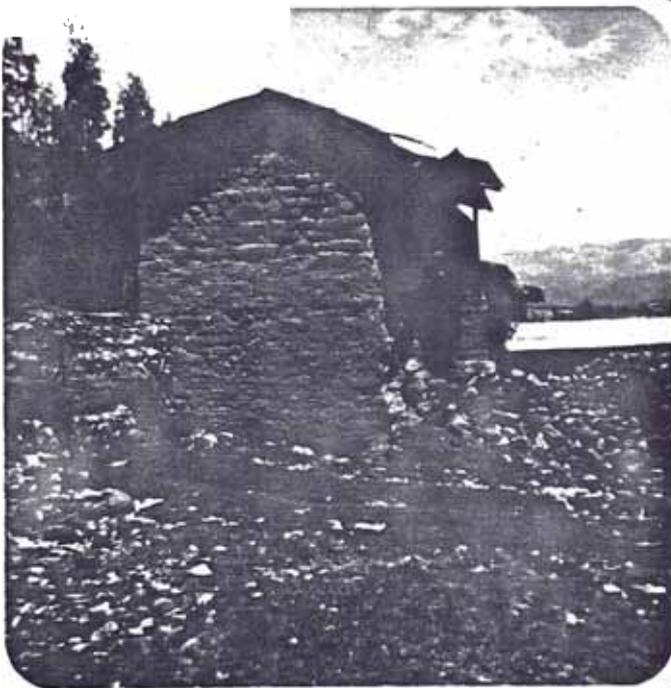
La otra zona está ubicada en la parte céntrica de la ciudad, que rodea a la plaza Vizcardo y Guzmán. Esta última zona está afectada por rellenos superficiales, realizados con el fin de nivelar la plaza y calles adyacentes, como pudo constatarse en el estudio de suelos. Estos rellenos han influido notablemente en los efectos destructores del sismo, ya que dentro de esta zona se encuentran viviendas con daño 5 MSK (colapso).

#### 8.5 EVOLUCION DE LA TECNICA CONSTRUCTIVA

La técnica constructiva está ligada a la antigüedad, vale decir que existen rasgos característicos en determinada construcción que se repiten en otra que fue conformada en la misma época.

## DAÑOS EN CONSTRUCCIONES DE ADOBE EN PAMPACOLCA

Construcción ubicada en la Pza. Vizardo, próxima a la excavación PZ-10. Daño 4 M.S.K.



Falla en esquina por flexión perpendicular a los muros. Vivienda próxima al PZ-2.

Colapso de una construcción antigua.



En este sentido, se aprecia en las construcciones antiguas, ciertas características que desgraciadamente se han ido dejando de lado con el tiempo.

Las construcciones antiguas, son generalmente masivas, muchas de ellas tienen muros que superan el metro de espesor, y que han sido conformadas por 4 ó más hileras de adobes adecuadamente enlazados. Los muros son asimismo bastante altos, aunque las viviendas, por lo general, sólo se limitaban a tener un piso.

Los ambientes, conformados de este modo, son sumamente amplios y el diseño arquitectónico clásico es disponerlos rodeando a un jardín interior cuyo acceso principal es un gran portón.

Adicionalmente a la gran rigidez de los muros, se dispone de arriostres laterales a nivel de techo. Estos se hacen con escuadras de troncos empotrados a los muros perpendiculares o por travezaños, empotrados, asimismo a muros paralelos (ver fotografías). El techo en todos los casos está conformado por tijerales de madera, torta de barro sobre un entramado de carrizo y la típica teja como cobertura.

Se nota tanto en Chuquibamba y Pampacolca, que por otro lado son ciudades contemporáneas, que esta técnica se abandona abruptamente. Las construcciones de años recientes (20 años a menos) son bastante diferentes.

Por un lado los anchos de muros no superan los 40 cm., manteniendo las alturas originales, es decir se aumentan las relaciones de esbeltez. Adicionalmente, las casas se hacen de dos pisos y se olvida por

completo el elemento de amarre a nivel de techo (llámese viga colar o arriostre). El techo, se hace de elementos de madera y la cobertura es generalmente de planchas de calamina.

Sintetizando, las construcciones nuevas presentan una técnica inadecuada de construcción con adobe, de allí su alto grado de daño comparativo con construcciones antiguas.

En el caso de las construcciones antiguas, obviamente, el efecto de los sismos anteriores (que han sido muchos), se ha dejado sentir, por lo que han cumplido con creces su vida útil.

## CAPITULO IX

### INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LOCALES EN LOS DAÑOS POR EL SISMO DEL 16/02/79 EN CHUQUIBAMBA Y PAMPACOLCA

#### 9.1 GENERALIDADES

Las experiencias que se obtienen de los movimientos sísmicos, aún tratándose de los no destructivos, constituye la más valiosa fuente de información para prever el comportamiento regional y local en casos de sismos de mayor magnitud. Esto es particularmente importante, en la condición de no contar con suficiente instrumentación que permitiría acumular otro tipo de información.

Las características de los sismos que pueden esperarse en un lugar determinado, dependen de factores cuya influencia es variable para cada evento; en algunos casos las condiciones locales del sitio influyen de manera determinante, mientras que en otros resultan de menor importancia.

Como resultado, dada la naturaleza tan compleja de la generación y propagación de los sismos que involucran factores, tales como, la localización del epicentro, propagación de las ondas, distancias recorridas, geología, etc., la incidencia de un sismo sobre un lugar determinado será diferente para cada evento. Sin embargo, siempre existe una tendencia general condicionada por los factores locales, que es preciso aclarar y fundamentar y se debe principalmente a la topografía del manto inferior y a características intrínsecas del suelo.

En los capítulos precedentes, se han analizado - las condiciones locales en forma independiente. En los siguientes puntos se intenta relacionar estas condiciones a los efectos observados por el sismo del 16/02/79.

## 9.2 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LOCALES EN LOS DAÑOS EN CHUQUIBAMBA

### 9.2.1 Topografía

La influencia de los factores topográficos es sumamente notable en Chuquibamba.

La evaluación de daños revela por una parte, que las edificaciones ante las condiciones topográficas tan desfavorables, se han acomodado a pendientes pronunciadas y a todas las irregularidades del terreno.

Por otro lado, la topografía crea condiciones desfavorables a la estabilidad de los depósitos de suelo, tanto en condiciones normales como cuando se producen sismos; de acuerdo a lo tratado en 7.5.3.

La gran pendiente de las calles de Chuquibamba, obliga a que las construcciones de adobe, presenten muros de alturas variables. Consecuentemente, la rigidez de éstos no es uniforme. Su comportamiento puede asimilarse al de una losa trapezoidal empotrada en su base. Como consecuencia de un sismo y al producirse flexión perpendicular al plano del muro, se puede intuir que el extremo más alto sufrirá mayores deformaciones que el extremo opuesto más corto y consecuentemente más rígido. La evaluación de daños confirma la hipótesis pues en la generalidad de los casos las fallas se concentraron en los extremos más altos.

Se ha demostrado, así mismo, que los taludes de la quebrada Huacucani son potencialmente deslizables ante la ocurrencia de un sismo. Esta eventualidad, es solamente previsible puesto que una falla del terreno que no se pueda evitar, acarrea de todas maneras fallas en la estructura que soporta.

Estos motivos explican la mayor incidencia de daños en terrenos con pendientes con relación a terrenos llanos o relativamente llanos.

### 9.2.2 Geomorfología y Geología

La geomorfología y geología en Chuquibamba están estrechamente ligadas. Las condiciones explicadas en 5.2, dan una idea de los factores que generan la inestabilidad a que se encuentra sujeta toda la región.

Los factores mencionados, son tanto de origen interno, determinados por la geología local, como de tipo externo. No se descarta que los sismos, aún los más pequeños

están ejerciendo influencia en los fenómenos geomórficos, como son los deslizamientos rotacionales y el asentamiento de las terrazas de Chuquibamba. Por otra parte, los sismos ocasionan desprendimientos en la corniza que circunda a la hondonada de Chuquibamba.

Los materiales geológicos, como son los depósitos del Volcánico Sencca, son tufos del tipo rosado que son fácilmente deleznable y pierden cohesión ante acciones mecánicas. En la temporada de lluvias se observa que las quebradas en la zona, acarrean cantidades considerables de agua, que aunque son eventuales, ocasionan gran erosión de las laderas y producen deslizamientos limitados que asimismo son activados por sismos.

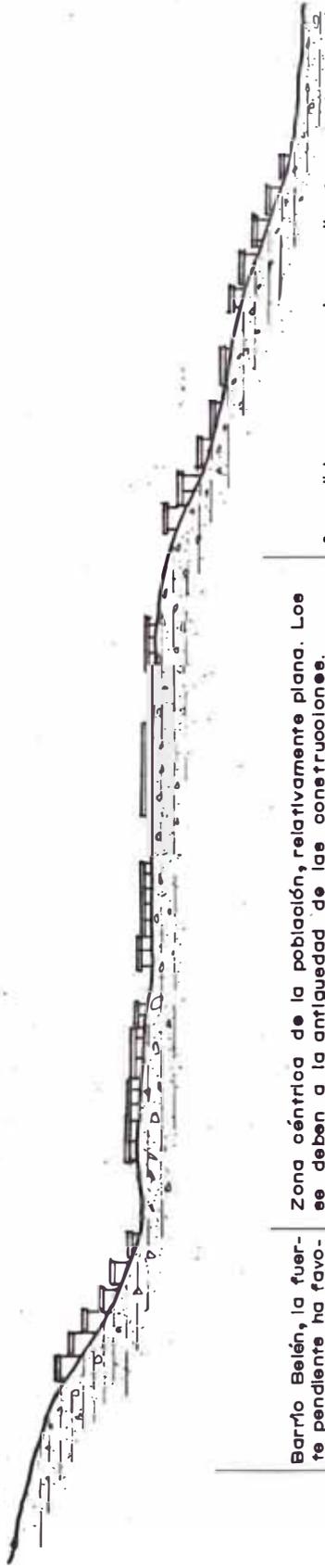
La quebrada Huacucani, que se encuentra al Sur de la población, tiene igual comportamiento, lo que significa un peligro latente para las laderas que la conforman, sobre todo para la ladera izquierda, donde se ubican gran número de viviendas.

Los fenómenos geomorfológicos que se presentan, son de carácter regional y afectan además de Chuquibamba a todas las pequeñas poblaciones ubicadas dentro de la hondonada.

### 9.3.3 Suelos

Los suelos de Chuquibamba están conformados por materiales predominantemente friccionantes con compacidades relativas comprendidas entre medianamente compactos a compactos. Las condiciones particulares de estos suelos están determinadas por la topografía tan accidentada en -

# CORTES ESQUEMATICOS DE CHUQUIBAMBA



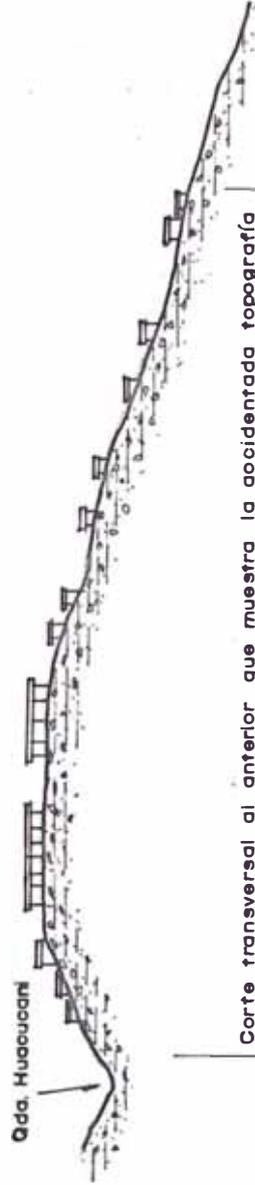
Barrio Belén, la fuerte pendiente ha favorecido daños severos.

Zona céntrica de la población, relativamente plana. Los edificios deben a la antigüedad de las construcciones.

A medida que crece la pendiente se acentúan los daños.

SUELO COMPACTO CONFORMADO POR GRAVAS Y ARENAS POBREMENTE GRADUADAS, ALGO LIMOSAS.

## CORTE SEGUN NO-SE



Corte transversal al anterior que muestra la accidentada topografía de la ciudad, con pendientes fuertes en ambos sentidos.

## CORTE SEGUN SO-NE

que se encuentran, de otro modo es decir en condiciones estables, su comportamiento resultaría adecuado.

En particular, ha quedado demostrada la inestabilidad de las laderas de la quebrada Huacucani, bajo los efectos combinados de sismo y cargas gravitacionales.

La influencia de las condiciones locales de suelo en los daños depende por lo tanto de las condiciones particulares en las que se encuentran depositados estos suelos, puesto que sus características propias no difieren apreciablemente entre los puntos explorados.

Las condiciones particulares a las que se hace referencia, están directamente ligadas a la configuración topográfica del depósito de suelo y sus condiciones de estabilidad.

### 9.3 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES LOCALES EN LOS DAÑOS EN PAMPACOLCA

#### 9.3.1 Topografía

La topografía en Pampacolca es menos influyente que en el caso de Chuquibamba.

Pampacolca se encuentra asentada sobre una zona amplia y relativamente plana, donde no se fijan claramente áreas con pendientes pronunciadas con potencialidad de deslizamiento de laderas que puedan afectar directamente a las viviendas.

Existe sin embargo, una zona ubicada en la margen izquierda de la acequia de regantes que discurre por -

el poblado, que presenta las mayores pendientes. En esta zona los daños observados, que resultaron ser mayores que en otras zonas, se explican fundamentalmente por motivos de estructuración de las viviendas. A semejanza de Chuquibamba, estas construcciones se han amoldado a la topografía lo que ha originado concentración de daños en los extremos más esbeltos de los muros.

El resto del área presenta condiciones topográficas muy favorables para el establecimiento urbano, lo que significa una gran diferencia con las condiciones estudiadas en Chuquibamba.

### 9.3.2 Geomorfología y Geología

La influencia de los factores geomorfológicos y geológicos en los daños en Pampacolca, es menos evidente que en Chuquibamba.

Los factores estudiados en 6.2 han servido para conocer el origen del valle y predecir su probable evolución. Es evidente que el orden de magnitud de los períodos de tiempo involucrados en la geomorfología supera largamente a los que son de interés en ingeniería.

Se destaca el origen morrénico del material sobre el cual se encuentra la población de Pampacolca, depositado durante un descenso del glaciar del valle. Asimismo resulta interesante que la planicie de Pampacolca haya quedado suspendida por una profundización del cauce del río Llato.

Dentro de la zona no existen procesos geodinámicos en acción, aunque se intuye que el marcado fallamien-

to existente debe tener significativa incidencia en la modificación de las características de los sismos.

### 9.3.3 Suelos

Los suelos de Pampacolca están conformados por arenas limosas arcillosas y gravas.

Las características de compacidad de las arenas limosas tienen un amplio rango de variación desde muy sueltas a compactas; en cambio los estratos de grava tienen valores altos de densidades relativas.

Los depósitos de suelo de Pampacolca no tienen los problemas de estabilidad de los suelos de Chuquibamba, porque las condiciones topográficas son más favorables. Sin embargo, las densidades relativas encontradas en los estratos superficiales hacen recomendable cimentar a una profundidad no menor de 1.00 m.

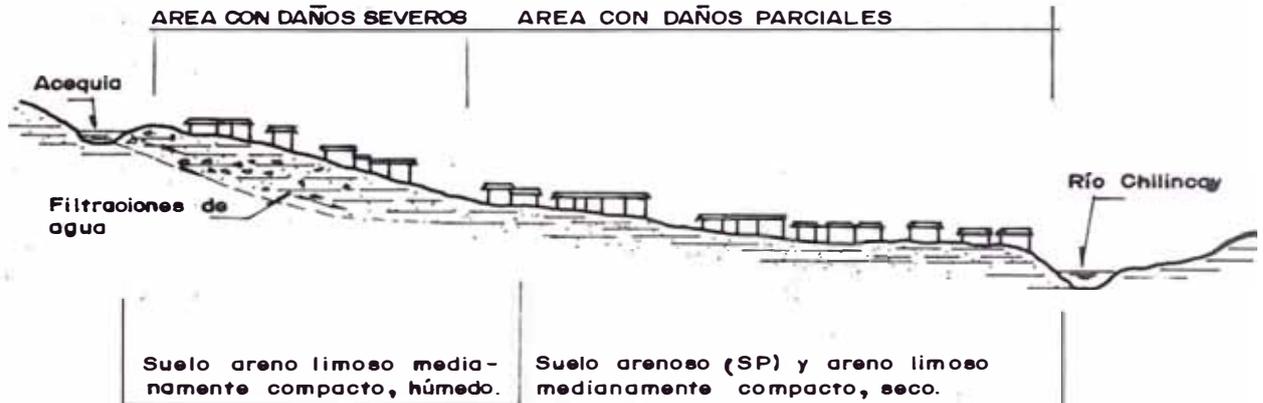
Por ese lado la magnitud de los daños está en razón inversa a los valores de densidad relativa.

Para la zona denominada Z-1 en la zonificación de suelos, se observa una mayor acumulación de daños con respecto a las otras zonas.

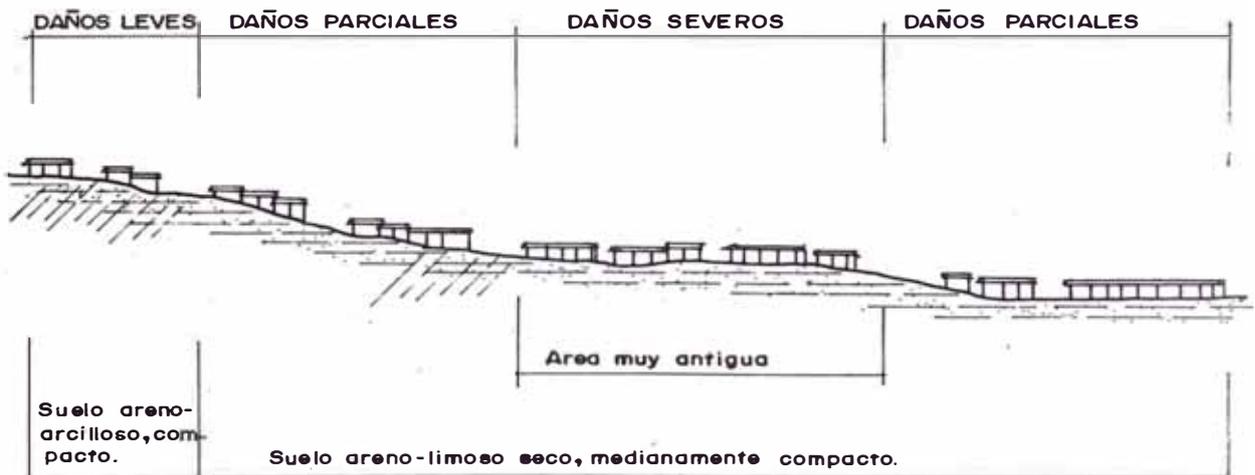
Sin embargo, la mayor acumulación de daños fuertes ocurre en la zona Z-3, cuyo suelo está conformado por rellenos artificiales con densidades relativas muy bajas.

Los daños altos encontrados en las viviendas ubicadas próximas a la acequia de regantes, se explican por la topografía del terreno y por las filtraciones provenientes

## CORTES ESQUEMATICOS DE PAMPACOLCA



## CORTE SEGUN SO-NE



## CORTE SEGUN NO-SE

tes de la acequia que han deteriorado las cimentaciones de las construcciones. En esta zona, los suelos tienen estratos de gravas con altas densidades relativas por lo que se concluye que en esta zona el suelo no ha ejercido influencia directa en los daños generados.

#### 9.4 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Los daños observados en las construcciones de adobe, están relacionados con la técnica constructiva utilizada.

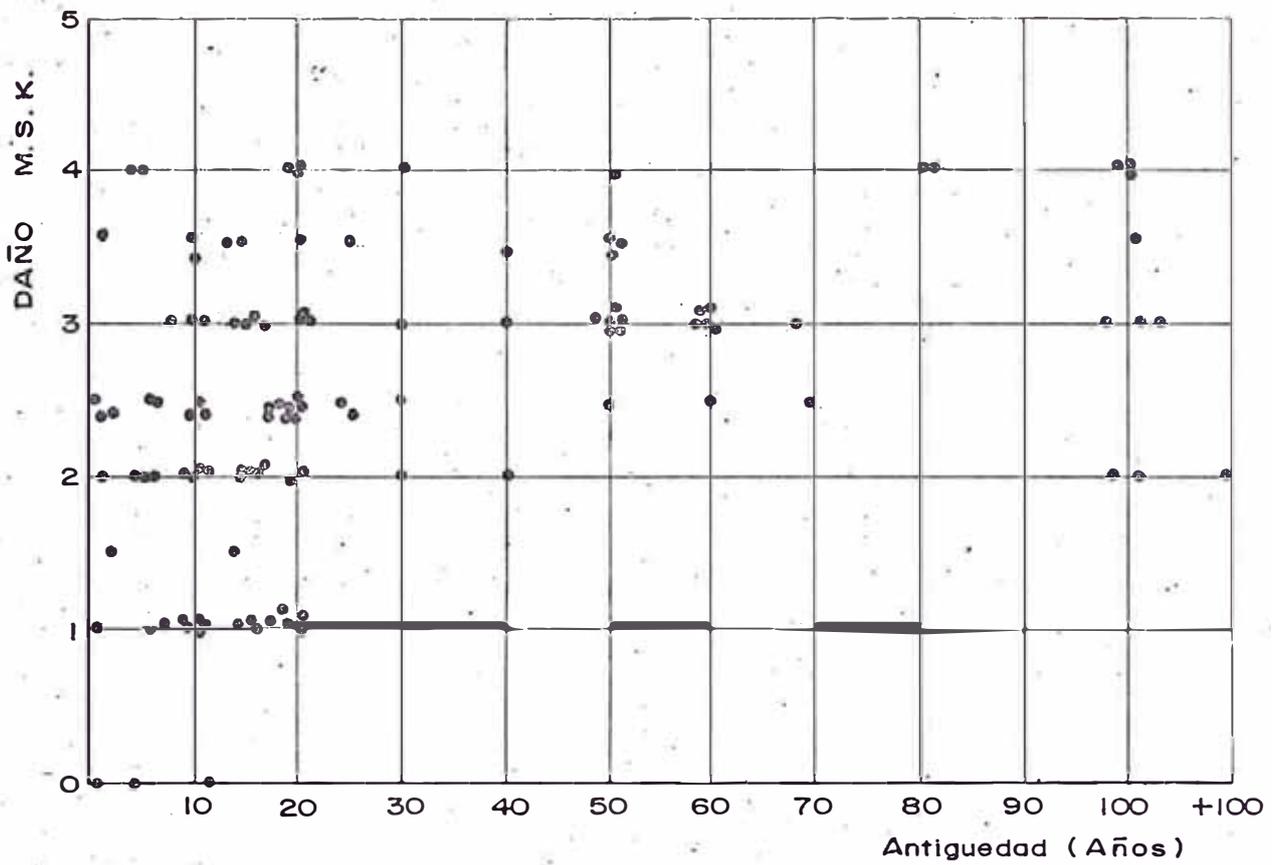
Se ha constatado que la evolución de la técnica constructiva es favorable a una mayor generación de daños vale decir que la experiencia de sismos anteriores no ha sido aplicada en el mejoramiento de las construcciones. - Esto es particularmente notable en Chuquibamba.

Las figuras 9.1 a y b, muestran las relaciones - entre los daños observados y la antigüedad de las construcciones, que son útiles para efectuar algunos comentarios.

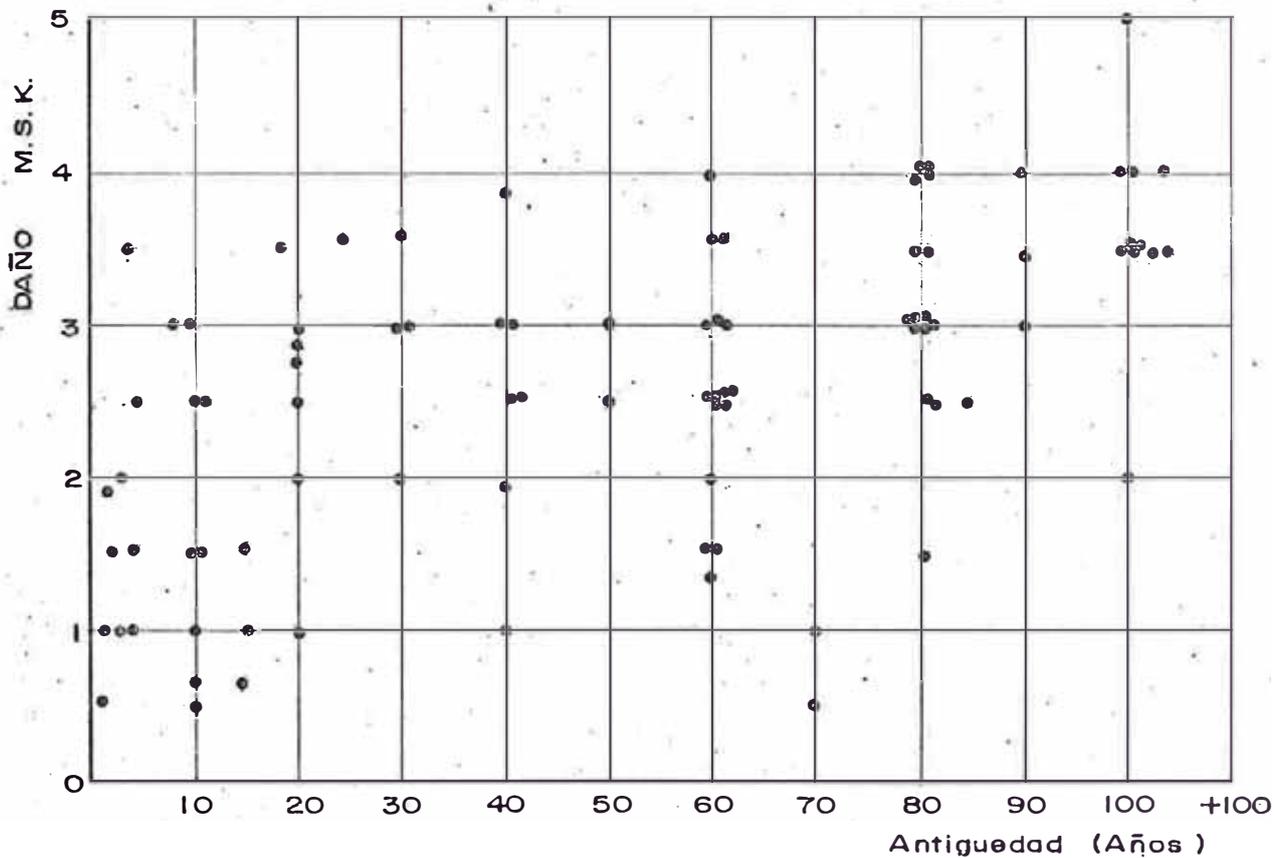
En el caso de Chuquibamba (Fig. 9.1 a) se nota - una gran acumulación de daños de grados altos para construcciones con antigüedades menores de 20 años. Esta circunstancia se explica por dos motivos:

Las construcciones relativamente nuevas presentan mayores defectos constructivos que las antiguas. Se da el caso de construcciones antiguas que han sufrido daños leves.

Las construcciones recientes están ubicadas en lugares más desfavorables, fundamentalmente en te--



a) CHUQUIBAMBA



b) PAMPACOLCA

Fig. 9.1 Relaciones entre la antigüedad y los daños.

rrenos con pendientes pronunciadas, por el contrario, las construcciones antiguas ocupan los lugares más estables.

Contrariamente a Chuquibamba, en Pampacolca (Fig. 9.1 b) se observa una relación directa entre el daño observado y la antigüedad. Se puede constatar que las construcciones nuevas presentan también muchos defectos constructivos, pero los daños en este caso quedan explicados por la mayor influencia de las condiciones de suelo.

Los principales defectos constructivos observados (Fig. 9.2 a) se anotan a continuación:

- Edificaciones de adobe de más de un piso que traen como consecuencia una altura excesiva de muros.
- Mezcla que se hace en los muros de piedra y adobes sin ningún ordenamiento adecuado.
- Falta de elementos de amarre a nivel de techos, llámese collarin de madera o viga collar de otro material.
- Defectuoso asentado de los adobes donde en muchos casos las juntas verticales son continuas, siendo ésta por lo general la zona de falla encontrada.
- Tamaño excesivo de los vanos de puertas y ventanas sobre todo en las casas antiguas donde predominan los portones.
- Falta de simetría en planta.

Obviamente las recomendaciones son la contraparte

## RESUMEN GRAFICO DE DEFECTOS CONSTRUCTIVOS

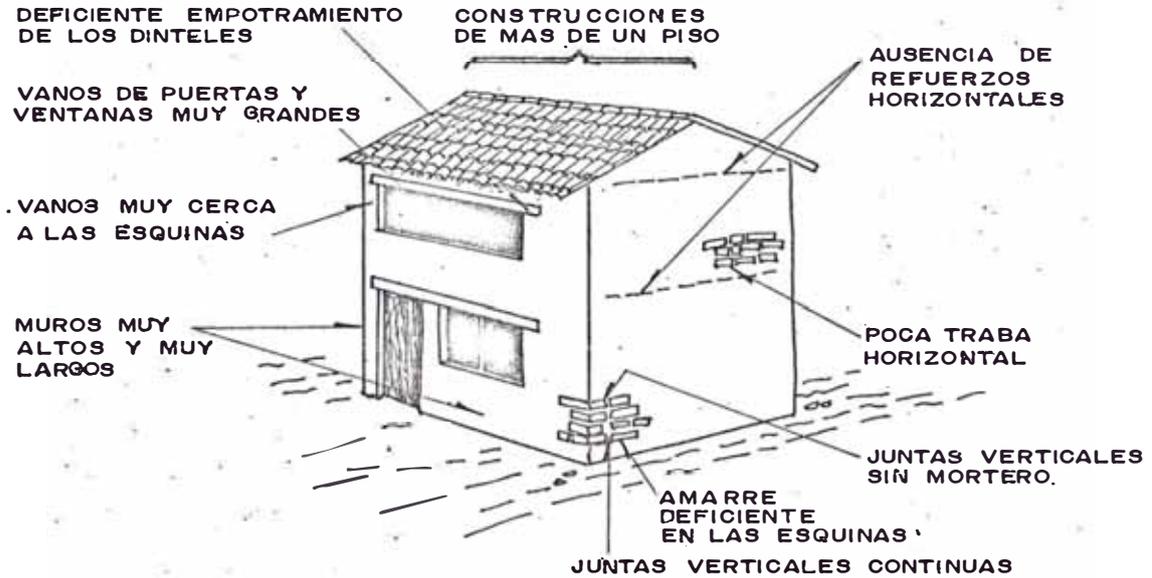


Fig. 9.2 a

## UNA BUENA CONSTRUCCION CON ADOBE TRADICIONAL

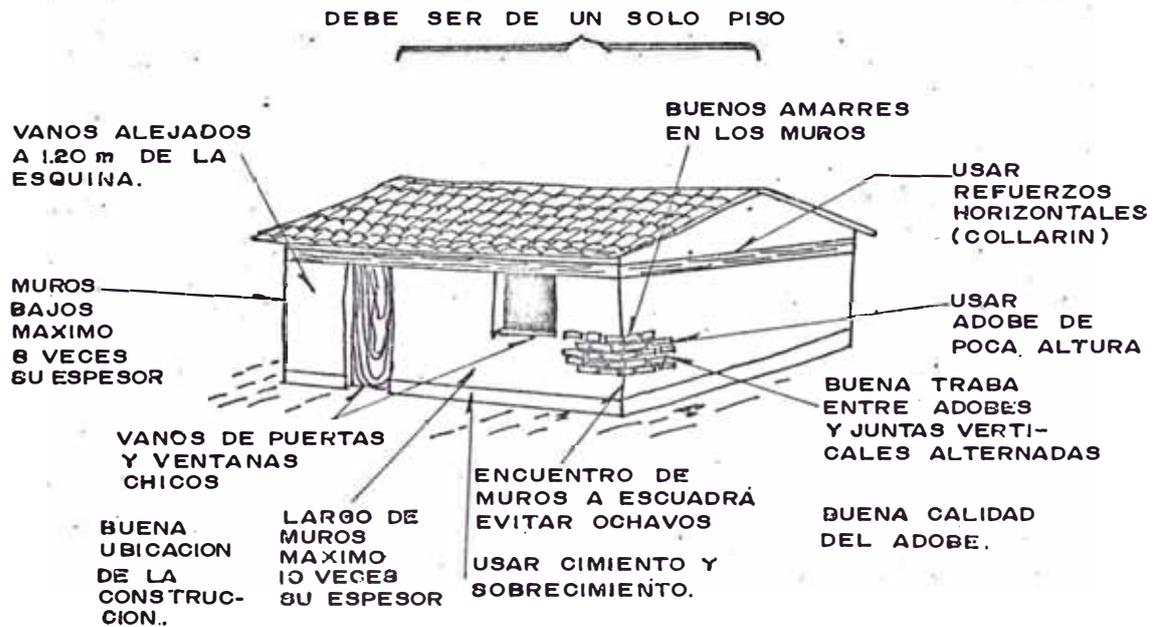


Fig. 9.2 b

de los defectos. La figura 9.2.b resume en forma gráfica las recomendaciones básicas, fruto de una larga experiencia, que deben tomarse en cuenta para una buena construcción con adobe tradicional.

El uso de otros materiales está limitado por condiciones económicas, por lo que es previsible que se seguirá construyendo con el tradicional adobe.

#### 9.5 ZONAS DE EXPANSION URBANA

Para el caso de Chuquibamba, se han determinado zonas aparentes para expansión urbana, al Sur del actual emplazamiento de la ciudad. La zona, ubicada cruzando la quebrada Huacucani, cuenta con pendientes moderadas y con características similares de suelo que Chuquibamba. Del mismo modo, en los alrededores de los colegios secundarios existen terrenos favorables para asentamiento urbano.

En algunos casos, en forma inevitable, se tendrá que cimentar sobre terrenos con pendiente. En estos casos es recomendable efectuar plataformas en corte para edificar las viviendas con separaciones adecuadas entre una vivienda y la adyacente.

En Pampacolca la expansión urbana debe tender a una mayor densificación de construcciones en el casco urbano, puesto que actualmente existen muchos terrenos sin construir. El problema en este caso, es asimismo menos agudo que en Chuquibamba.

## C A P I T U L O X

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo está orientado a estudiar la influencia de las condiciones locales en los daños por el sismo - del 16 de Febrero de 1979.

Con este objeto ha sido planteada una metodología de estudio sencilla y sobre todo económica que se adecuaba a nuestras limitaciones de recursos para este tipo de estudios.

A continuación se enumeran las conclusiones a las que se ha llegado:

1. El área estudiada presenta un historial sísmico muy - amplio, encontrándose entre las poblaciones afectadas por terremotos con una intensidad probable de VII a XI M.M.

2. El estudio de la sismicidad regional revela la gran actividad sísmica presente en el área, que se caracteriza sobre todo por una liberación de energía en forma continua a través de sismos de pequeña magnitud. Para el caso de sismos de magnitudes grandes, se observa que la frecuencia sísmica disminuye apreciablemente.
3. De acuerdo a lo anterior, el período de retorno para sismos de magnitud 5 Mb es de sólo 3.3 meses y de 143 años para sismos de magnitud 7 Mb. Estos períodos han sido evaluados por medio de la función de valores extremos modificada.
4. Una estimación probabilística de la ocurrencia de sismos en el área, para 5 y 10 años es la siguiente: Para los próximos 5 años es probable que ocurran 2 sismos de magnitud 6 Mb. Para los próximos 10 años existe un 82% de probabilidad de que ocurran 3 sismos de magnitud 6 Mb, de igual modo se espera un sismo de magnitud 6.3 Mb con 68% de probabilidad de ocurrencia.  
  
Es improbable la ocurrencia de sismos de magnitud cercana a 7 Mb en los próximos 10 años.
5. El modelo estadístico empleado no puede representar adecuadamente el comportamiento sísmico para magnitudes relativamente pequeñas.
6. Las condiciones locales encontradas en Chuquibamba y Pampacolca son muy particulares.

En Chuquibamba destaca la escarpa que rodea a la pro-

funda hondonada y la estructura de las terrazas escalonadas, una de las cuales contiene a la población de Chuquibamba. Se tratan de terrazas de deslizamiento o de rotura y resbalamiento del terreno primitivo.

Los desprendimientos son de períodos geológicos recientes y posiblemente el deslizamiento haya sido lento y a intervalos de tiempo, tanto que aún hoy en día, continúa el proceso, especialmente cuando se producen sismos de cierta magnitud. Este es uno de los motivos por lo que cuando se manifiestan sacudidas sísmicas, - los efectos en las construcciones de los centros habitados de la hondonada sean tan desastrosos.

7. Se puede establecer con seguridad, que la zona de Chuquibamba se encuentra en condiciones de equilibrio inestable por el hecho que aún no se ha realizado un asentamiento definitivo entre los bloques deslizados.
8. Los suelos de Chuquibamba son depósitos predominantemente friccionantes que presentan buenas condiciones de compacidad relativa, sin embargo su comportamiento está condicionado por las situaciones particulares en que se encuentran, que son fundamentalmente condiciones de tipo topográfico.
9. Se ha examinado la peligrosidad que presentan las laderas de la quebrada Huacucani por inestabilidad de - taludes. Un fenómeno de este tipo ocurrió en estas - laderas durante el sismo del 16 de Febrero de 1979.
10. La evaluación de daños en construcciones de adobe en Chuquibamba revela que la técnica constructiva no es

adecuada y ha sufrido modificaciones desfavorables - respecto a la técnica utilizada en construcciones más antiguas.

11. Los daños de grados altos en construcciones nuevas - en Chuquibamba, que se observan en áreas como el barrio Belén y zonas adyacentes, se justifican por factores mencionados en el punto anterior y porque éstas construcciones ocupan lugares muy desfavorables sobre terrenos con muchas irregularidades y pendientes pronunciadas.

En el caso de las construcciones antiguas, se observa que la técnica constructiva es más adecuada, los daños observados son por lo tanto, resultado del efecto acumulativo por eventos sísmicos pasados.

12. Las condiciones locales de Pampacolca están denominadas por el origen morrénico del valle. El subsuelo - sobre el que se encuentra la ciudad y su campiña está formado por material de morrenas. La potencia de este manto está calculada en unos 250 metros.
13. Por procesos hidrogeológicos el valle de Pampacolca - quedó suspendido.
14. No es clara la influencia del marcado fallamiento de la zona, en la modificación de las características de los sismos, aunque no se descarta que exista dicha influencia.
15. Los suelos de Pampacolca están conformados por arenas limosas - arcillosas con variedad de densidades relativas. Las zonas adyacentes a los cursos de agua que

discurren por la población, contienen potentes estratos de gravas con altas densidades relativas. Existe sin embargo, una zona céntrica dominada por rellenos superficiales sueltos en los cuales se han presentado daños de grados altos.

16. Las condiciones topográficas de los suelos de Pampacolca garantizan su estabilidad, una condición que no se presenta en Chuquibamba.
17. Los daños en Pampacolca se explican por la antigüedad de las construcciones, la deficiente técnica constructiva empleada y la influencia de la condición suelo - en áreas de baja densidad relativa.

Las poblaciones materia de estudio, presentan en la actualidad un aspecto precario, particularmente Chuquibamba tiene un gran porcentaje de viviendas antiguas que constituyen un peligro latente para sus moradores.

Del mismo modo, se observa que la renovación urbana es prácticamente nula.

Seguidamente se anotan algunas recomendaciones generales:

Considerando que por factores económicos, las construcciones deban seguir haciéndose de adobe tradicional, deberán tenerse en cuenta los siguientes puntos:

Las construcciones deben limitarse a un piso con una altura máxima de 3 m. entre piso y viga collar.

Debe respetarse homogeneidad en los muros, es

decir no deben hacerse mezclas de piedra asentada con barro y adobes en un mismo muro y en general todos los muros deben hacerse de un solo material.

- . Proveer de elementos de amarre a nivel de techos, lo que se llama viga collar que puede ser madera u otro material.
  - . El asentado de los adobes debe ser controlado, - las juntas verticales deben ser alternadas entre hilada e hilada.
  - . Los vanos de puertas y ventanas deben ser pequeños, deben evitarse los portones.
  - . Utilización de coberturas ligeras, como son los de calamina.
  - . Uso de cimiento y sobrecimiento.
- Para el caso de Chuquibamba, donde se presenta inevitablemente la necesidad de cimentar en terrenos con pendiente, es recomendable hacerlo sobre plataformas en corte de modo que los muros tengan alturas uniformes.

Debe evitarse la edificación de viviendas en las zonas adyacentes a la quebrada Huacucani.

- Las zonas de expansión urbana, recomendables para Chuquibamba se presentan al sur del actual emplazamiento en las inmediaciones de los colegios secundarios y en una zona más amplia cruzando la quebrada Huacucani.

Para el caso de Pampacolca, su expansión deberá tender a una mayor concentración de viviendas dentro del actual emplazamiento urbano.

## B I B L I O G R A F I A

1. SILGADO E.: Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Bol. N° 3, Instituto de Geología y Minería. Enero 1978. Lima.
2. MELECIO LAZO ANGULO: Características Sísmicas sobre el sismo del 16 de Febrero de 1979 y las construcciones en Arequipa. Junio 1979. Arequipa.
3. CH'EN P'EL-SHAN y LIN PANG-HUI: An application of Statistical Theory of Extreme Values to moderate and long-interval Earthquake Prediction. Institute of Geophysics, Academia Sinica January-December 1973.
4. N.M. NEWMARK, E. ROSENBLUETH: Fundamentals of Earthquake Engineering, Prentice Hall 1971.
5. RUIZ SONIA: Influencia de las condiciones locales en las características de los sismos. Instituto de Ingeniería. UNAM., México.
6. MAÑA F.: Cimentaciones Superficiales. Editorial Blume 1975.
7. ANAYA VARGAS A.: Reconocimiento Geológico entre Pampacolca, Machahuay y Tipan. Tesis UNSA Arequipa.
8. JUAREZ VARGAS V.: Geomorfología de la hoja de Pampacolca. Tesis UNSA. Arequipa.

9. INGEMET: Plano Geológico del cuadrángulo de Chuquibamba. Inédito.
10. TERZAGHI K., PECK R.: Mecánica de suelos en la Ingeniería Práctica. El Ateneo, Barcelona 1972.
11. LAMBE W., WHITMAN R.: Mecánica de Suelos, Limusa - Willey, México 1972.
12. CARRILLO GIL A.: Comentarios sobre el efecto de los terremotos en los suelos del Perú. Primer Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Agosto 1978. Lima.
13. KUROIWA J., BELTRAN S., ORIHUELA P., RODRIGUEZ C., - SAITO J. y TOVAR O.: Microzonificación Sísmica Aplicada al Planeamiento Urbano de las Zonas Afectadas por el Sismo de Arequipa del 16 de Febrero de 1979. Forum: Arequipa Año 2000. Arequipa, Agosto 1980.
14. KUROIWA J., BELTRAN S., ORIHUELA P., RODRIGUEZ C., - SAITO J. y TOVAR O.: Diseño de las Viviendas Económicas en zonas sísmicas. III Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Cuzco, Octubre 1980.