

1  
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO GEOLOGICO - GEOTECNICO EN EL  
CAÑON DE LA ZURDA, SOBRE EL RIO VERDE,  
ESTADO DE JALISCO

TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOLOGO  
P R E S E N T A :  
RUBEN SALVADOR ALVAREZ PEREZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



MEXICO, D. F.,

ABRIL 1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E   G E N E R A L

		PAGINA
1	INTRODUCCION	1
	1.1 ANTECEDENTES	1
	1.2 OBJETIVOS	2
	1.3 GENERALIDADES	3
	1.3.1 Localización y Vías de Comunicación	3
	1.3.2 Hidrografía	5
	1.3.3 Climatología	6
	1.3.4 Población	6
	1.4 ESTUDIOS PREVIOS	7
	1.4.1 Generalidades	7
	1.4.2 Relación de Estudios	9
	1.4.3 Resultados	10
	1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO	17
2	GEOLOGIA REGIONAL	18
	2.1 FISIOGRAFIA	18
	2.2 ESTRATIGRAFIA	20
	2.2.1 Tobas e Ignimbritas Acidas Terciarias, Tig	21
	2.2.2 Terciario Superior Lacustre, Ts-La	21
	2.2.3 Terciario Superior Basaltos, Ts (B)	23
	2.2.4 Cuaternario Basaltos, Q (B)	24
	2.2.5 Aluvión, Q (A1)	24
	2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL	25
	2.4 TECTONICA	28
	2.5 RIESGO SISMICO	30

3	GEOLOGIA DEL EMBALSE	39
3.1	ESTRATIGRAFIA	39
3.2	ESTRUCTURAS	42
3.3	GEOHIDROLOGIA	45
3.4	GEDTECNIA	46
3.5	BANCOS DE MATERIAL	47
4	GEOLOGIA DEL CAÑON DE LA ZURDA	49
4.1	ESTRATIGRAFIA	51
4.1.1	Unidad Masiva (UIII)	51
4.1.2	Unidad Estratificada (UII)	52
4.1.2.1	Paquete Lacustre Inferior (UIIa)	52
4.1.2.2	Paquete Fluvial (UIIb)	54
4.1.2.3	Paquete Lacustre Superior (UIIc)	55
4.1.2.4	Arenisca Pumitica Andesita (UIId)	56
4.1.3	Unidad Basáltica-Andesítica (UI)	57
4.1.4	Unidad Superior Vulcanoclástica (Us)	58
4.1.5	Terrazas Aluviales (Qte)	59
4.1.6	Material de Talud (Qt)	59
4.1.7	Material de Acarreo (Qac)	60
4.2	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	60
4.2.1	Generalidades	60
4.2.2	Análisis Estereográfico de las Discontinuidades	61
4.2.2.1	Fracturamiento	61
4.2.2.2	Estratificación	68
4.2.3	Descripción de Fracturas y Fallas	70
4.3	ESTUDIO DE LAS ARCILLAS Y LIMOS	80
4.3.1	Distribución de Arcillas y Limos	80
4.3.2	Pruebas de Laboratorio	82
4.3.2.1	Difracción de Rayos X	83
4.3.2.2	Fluorescencia de Rayos X	84
4.3.2.3	Composición Normativa	85

5	GEOTECNIA	89
5.1	PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA ROCA INTACTA	90
5.1.1	Pruebas de Laboratorio	91
5.1.1.1	Densidad	92
5.1.1.2	Compresion Simple y Deformabilidad	93
5.1.1.3	Resistencia a la Carga Puntual	96
5.1.1.4	Módulos de Elasticidad Dinamicos	99
5.1.2	Resultados	100
5.2	ZONIFICACION GEOTECNICA	107
5.3	CLASIFICACION INGENIERIL DE LAS ROCAS	114
5.4	ANALISIS DE LOS DERRUMBES DEL CAÑON	122
5.5	ANALISIS DE LOS PROBLEMAS GEOTECNICOS	125
5.5.1	Problema I (Estabilidad)	125
5.5.2	Problema II (Tubificación)	128
6	SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
6.1	CARACTERISTICAS GEOLOGICO-GEOTECNICAS DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS	138
6.2	CONCLUSIONES DEL PROBLEMA I (Estabilidad)	146
6.3	CONCLUSIONES DEL PROBLEMA II (Tubificación)	148
	BIBLIOGRAFIA	150

## 1 INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

Actualmente la ciudad de Guadalajara cuenta con un abastecimiento suficiente de agua, tanto para uso potable como de uso industrial; este suministro se obtiene, en parte, por la explotación del acuífero que está en el valle denominado Tezitan - Atemajac y otra parte proviene del Lago de Chapala.

Tomando en cuenta el crecimiento demográfico, y la expansión industrial que va a tener la ciudad y área metropolitana de Guadalajara para el año 2000, se prevé un déficit en el abastecimiento de agua, por lo que será necesario recurrir a fuentes más lejanas, a fin de no sobreexplotar el acuífero del valle de Tezitan - Atemajac, actualmente en equilibrio, así como el Lago de Chapala.

Una de las principales alternativas para el suministro de agua es el aprovechamiento del Río Verde, potencialmente utilizable mediante la construcción de una presa en la zona del cañón de "La Zurda", que podría almacenar un volumen de agua de aproximadamente 750 millones de metros cúbicos y derivar 10 metros cúbicos por segundo. La conducción a la zona metropolitana de Guadalajara se realizaría por un acueducto de aproximadamente 70 km de longitud.

El cañón de "La Zurda" ha sido elegido por estar ubicado a una altura que permite la conducción del agua por gravedad a Guadalajara y por que cuenta con las condiciones topográficas e hidrogeológicas adecuadas para la construcción de una cortina, asimismo por presentar una amplia zona de embalse.

Sin embargo, las rocas que se presentan en el cañón plantean problemas geotécnicos para la construcción y operación de la presa, ya que está formado por rocas blandas situadas en el límite permisible para la construcción de grandes presas.

Este sitio se ha estudiado desde el año de 1949 e incluso se empezaron a realizar trabajos de regularización y construcción del vertedor de demasias y túnel de desvío, pero al parecer, por motivos económicos se suspendieron las obras de construcción. Desde el primer informe hasta la fecha, se habían estudiado cinco alternativas de ejes en la zona del cañón, y se tenía planteado un modelo estratigráfico y una idea de las características geotécnicas de las unidades litológicas que conforman el cañón, en base a perforaciones y pruebas de permeabilidad en dos ejes, sin embargo se desconocía la distribución y características geológico-geotécnicas de las unidades litológicas que afloran en el cañón, así como en toda el área que va a comprender el embalse.

En el cañón se habían determinado tres unidades litológicas:

Basaltos (Unidad I) que esta sobre el nivel del embalse; Unidad volcanoclástica estratificada (Unidad II), queda en el area de construcción de la cortina y el embalse; Unidad de toba lacustre masiva (Unidad III) y que forma la porción inferior del cañón.

La Unidad III, se ha considerado que en algunos ejes se encuentra más compacta e impermeable que en otros, suponiéndose que existen dentro de ella, zonas francamente deleznable y que no soportaran la carga hidraulica proyectada (8 kg/cm<sup>2</sup>): así mismo se presume que existen horizontes que se tubificarán durante la operación del embalse, poniendo en peligro la estabilidad de la presa. La zona más superficial (primeros 15 m), tienen una resistencia al corte muy baja, sin saberse si es homogénea o heterogenea esta propiedad. (Se le ha denominado problema II).

La Unidad II, es una alternancia de areniscas, tobas, arcillas y limolitas. Las arcillas se supone que son bentonitas expansivas y por su presencia, al funcionar el embalse, se infiere que se hincharán y provocaran deslizamientos de ladera que pueden llevar a la destrucción de la presa. Estos deslizamientos se supone serán más grandes en las zonas donde se encuentra la Unidad I de basaltos cercanos a las paredes del cañón. En esta zona se aprecian derrumbes de la Unidad I que se han deslizando hacia el cauce del rio. (Se le ha denominado problema I).

Por tal motivo la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos encomendó la elaboración de un estudio geológico geotécnico en el Cañón de La Zurda sobre el Río Verde, Estado de Jalisco, en el cual participé y fue motivo de mi tesis, y en el que se utilizan las técnicas avanzadas de geología aplicada a la ingeniería a fin de tener un modelo geológico-geotécnico de las unidades de roca que permitan localizar y analizar los problemas geológicos para el proyecto.

## 1.2 OBJETIVOS

- Zona del Cañón.- El objetivo del estudio geológico detallado de la zona del cañón fue determinar la distribución y las características estratigráficas-estructurales y geotecnicas de las diferentes unidades litológicas, que permitieran analizar y cuantificar los problemas de rompimiento de la ladera por expansión de las capas de arcilla (problema I) y el de posibilidades de tubificación y rompimiento de la roca por subpresiones (problema II).

En forma particular, los principales objetivos del estudio por unidad litológica fueron los siguientes:

En la Unidad III, definir la homogeneidad o heterogeneidad a lo largo de todo el cañón. Caracterizándola desde el punto de vista petrologico-petrografico (modelo de depósito), propiedades físicas y propiedades dinámicas. Zonificarla geológica y geotécnicamente. Describir la zonificación de acuerdo a clasificaciones ingenieriles. Cuantificar los defectos geológicos que se han obtenido a esta unidad, y definir la mejor zona desde el punto de vista geotécnico. Producir un estudio geoestadístico de las propiedades medidas que nos defina la heterogeneidad y homogeneidad de la formación. Analizar y cuantificar el problema II.

En la Unidad II, conocer al detalle las capas, la composición de la unidad y medir el espesor de todas las capas de arcilla. Localizar las capas expansivas y definir el área que tenga menor cantidad de estas arcillas y mejores características desde el punto de vista geotécnico, evaluando la magnitud del problema. Definir el modelo geológico de depósito de esta Unidad que explique sus variaciones. Analizar y cuantificar el problema I.

Zonificar el cañón de acuerdo a la clasificación de Geología aplicada a la Ingeniería, demostrando cuáles son las mejores zonas desde el punto de vista geológico-geotécnico para la localización del proyecto de presa.

### 1.3 GENERALIDADES

#### 1.3.1 Localización y Vías de Comunicación

La zona de estudio está ubicada en la porción noroccidental del Estado de Jalisco, a 30 km en línea recta del poblado de Valle de Guadalupe (Figura 1.1). Las coordenadas geográficas aproximadas del área del vaso son:

de 21 grados 07' y 30" a 21 grados 30' latitud norte y de 102 grados 45' longitud oeste; las coordenadas del cañón "La Zurda" son:

21 grados 12' latitud norte y 102 grados 41' longitud oeste.

Los poblados más cercanos al vaso son Teocaltiche, San Gaspar de los Reyes, San Nicolás, Belén del Refugio, Jalostotitlán y Mexitacán; las poblaciones más cercanos al cañón son Temacapulín y Cañadas de Obregón, que están ubicados a 7 km aproximadamente.



Para llegar a la zona del cañón, se parte del poblado de Valle de Guadalupe, Jal., por la carretera a San Juan de los Lagos y recorriendo 5 km se desvía a la izquierda por la carretera pavimentada que va a Villa Obregon, transitando sobre esta 28 km; para posteriormente tomar hacia la derecha sobre una terracería que conduce a Mexicacán, transitable todo el año, con un desarrollo de 7 km y al llegar al Río Verde tomar otra desviación a la derecha que conduce al Eje No. 1 sobre la margen izquierda, a una distancia de 1000 m.

La zona del vaso se encuentra bien comunicada; es atravesada por la carretera pavimentada que va de Jalostotitlán a Teocaltiche; así como por una gran cantidad de terracerías y brechas transitables que van a las poblaciones y rancherías de la zona.

### 1.3.2 Hidrografía

Excluida la cuenca Lerma-Chapala, existen sólo otras seis cuencas que por sus características y proximidad, pueden ser prospectos para abastecimiento de agua a la zona metropolitana de Guadalajara. El Río Verde ofrece la posibilidad de que se construya la cortina y almacenar el agua, en un vaso que quedaría cien metros arriba del nivel medio de la ciudad, a una distancia lineal de 90 km, interceptando el 84% de la cuenca total, equivalente a 17 241 km<sup>2</sup>, con las condiciones favorables para conducir el agua a la ciudad de Guadalajara.

El Río Verde tiene varios ríos tributarios en la zona de estudio, siendo los principales ríos afluentes los Jalostotitlán, Teocaltiche, Encarnación, San Juan de los Lagos y Mazcua. A su vez el Río Verde es un importante afluente de Río Santiago. Los escurrimientos medidos en la estación hidrométrica "la cufia" (17,097 km<sup>2</sup>) son de 881.9 millones de metros cúbicos y volúmenes de lluvia de 11,200 a 14,960 millones de metros cúbicos.

Las reservas del potencial del Río Verde para demandas de agua potable y de riego, no para Guadalajara, son de 4.5 metros cúbicos por segundo igual a 142 millones de metros cúbicos al año (Sandoval, 1980)

El potencial de las cuencas interceptadas se estima en 7 metros cúbicos por segundo, equivalentes a 250 millones de metros cúbicos al año, ya dejando 13 millones de metros cúbicos para riegos ya establecidos. La oferta para el proyecto es entonces de 904 millones de metros cúbicos, equivalentes a 28.7 metros cúbicos por segundo (Sandoval, 1980).

### 1.3.3 Climatología

La precipitación media anual es de 662 mm concentrándose el 92% entre los meses de junio a octubre; la temperatura media anual es de 18.5 grados centígrados, teniendo temperaturas máximas en el mes de mayo de 41 grados centígrados y mínimas de -10.5 grados centígrados en el mes de enero. La evaporación media anual es de 2105 mm.

### 1.3.4 Población

El área de estudio comprende parte de los municipios de Teocaltiche, Mexxicacán, San Juan de los Lagos, Jalostotitlán y Valle de Guadalupe. Cuyas cabeceras municipales, de mismo nombre, cuentan con servicios de teléfono, telégrafo, centros médicos, hospedaje, combustible y bancos. Hay un gran número de poblados que van desde pequeñas rancherías hasta poblados que llegan a contar con servicios de energía eléctrica y telégrafo.

Las poblaciones y rancherías que quedarán inundadas por el agua del embalse (considerando como NAME la cota 1700) son:

En el río Encarnación, las rancherías de Villa Ornelas, 584 habitantes y La Trinidad que quedaría inundada parcialmente y cuenta con 330 habitantes. En el Arroyo del Agostadero, dos rancherías llamadas Halconeros y Halconeros de Abajo. En el Río Mazcuza, la ranchería de Mazcuza con 413 habitantes. En el Río San Juan de los Lagos, la ranchería de Miti y el poblado San Gaspar de los Reyes, que es el de mayor importancia que va a ser afectado y cuenta con alrededor de 1500 habitantes.

En el Río Verde, el poblado más importante que sería inundado es San Nicolás que cuenta con una población de 900 habitantes, y una serie de rancherías que son: El Pueblito, Paso de la Canoa, Paso del Sabino y Paso de Cañas, Rincón de los Cedros y El Cuartel, Pueblo Nuevo, El Morisco, Mendocina, Teocaltitan y un gran número de casas aisladas.

## 1.4 ESTUDIOS PREVIOS

### 1.4.1 Generalidades

El sitio de La Zurda se comenzó a estudiar desde 1946 y hasta 1955, en el ahora denominado Eje 2. En 1956 se decidió cambiar el Eje hacia aguas abajo a un sitio denominado Inferior (que ahora corresponde al Eje 1), en el cual se inició la construcción de la presa, realizándose los trabajos de limpia y regularización, así como la excavación del vertedor y el túnel de desvío. En 1959, el proyecto fue abandonado por razones presupuestales y debido a que en 1958, el Lago de Chapala recuperó su nivel medio normal (Sancen, 1984). En la Figura 1.2 se muestra la localización de las alternativas.

En 1970, resurge el interés por el proyecto, con fines de abastecimiento de agua a Guadalajara y la posible generación de energía hidroeléctrica, y se efectúan, en 1975 estudios geológicos adicionales en la boquilla original.

En 1982, se estudia una nueva alternativa, la boquilla "Superior", aguas arriba de la boquilla original, (ahora denominada Eje 3), debido a problemas de inestabilidad en las laderas.

Posteriormente, en 1984 se realiza un análisis de la información geológica y se proponen dos nuevos sitios de boquilla, denominados Eje 4 y 5, localizados aguas arriba del Eje 3: los cuales tienen la diferencia de que no afloran los basaltos en las laderas, con lo que se reduciría el peso volumétrico encima de las arcillas de la Unidad II.

En 1985 se efectúa una reunión de trabajo en donde se discuten los resultados de las exploraciones geológicas y se plantea una propuesta para el análisis de los problemas geológicos del sitio.

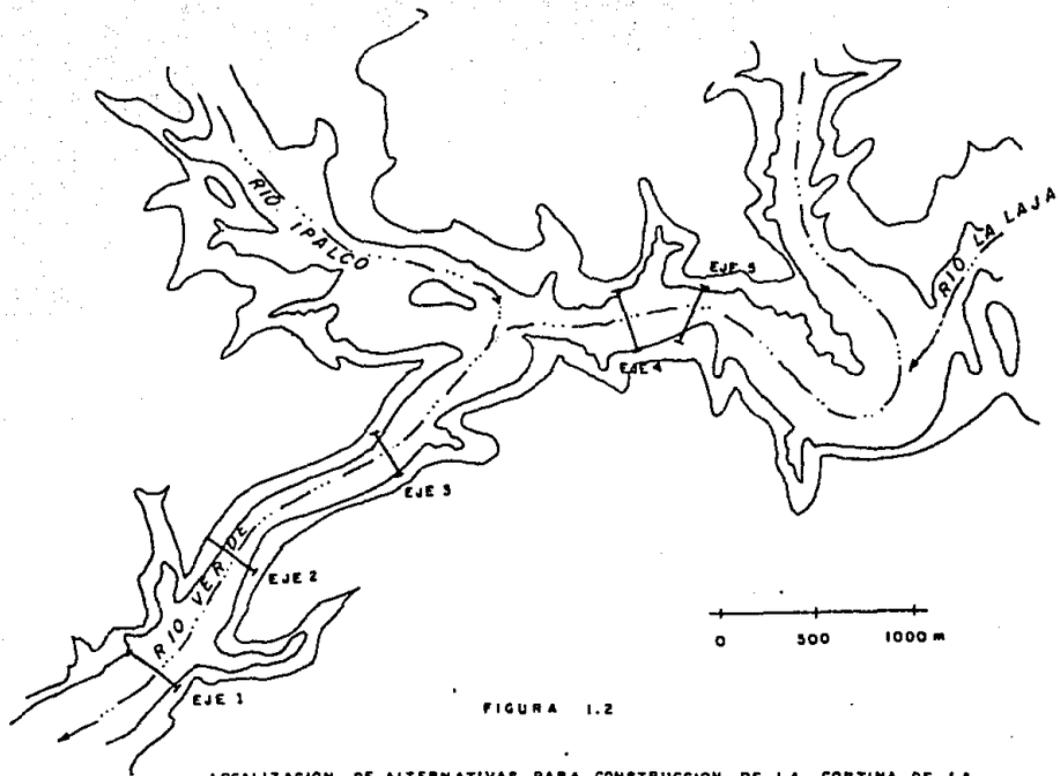


FIGURA 1.2

LOCALIZACION DE ALTERNATIVAS PARA CONSTRUCCION DE LA CORTINA DE LA  
"PRESA LA ZURDA"

#### 1.4.2 Relación de Estudios

Los estudios geológicos anteriores fueron ejecutados por la Dirección General de Estudios y el Consultivo Técnico de la S.A.R.H. A continuación se presenta una relación, en orden cronológico, de los estudios:

FECHA	NOMBRE DEL ESTUDIO	AUTOR
ABRIL 1946	CONDICIONES GEOLOGICAS DE LA BARRANCA DEL RIO VERDE, AGUAS ARRIBA DE TEMACAPULIN.	DR. PAUL WITZ
ABRIL 1949	INFORME ACERCA DE LAS CONDICIONES GEOLOGICAS DE LA BOQUILLA DE LA ZURDA, SOBRE LA BARRANCA DEL RIO VERDE, ESTADO DE JALISCO.	JORGE ORTIZ FERNANDEZ DEL CAMPO.
12 AGOSTO 1947 MEMO. 13-2-349	INFORME VISITA DE INSPECCION SITIO LA ZURDA.	ING. ANTONIO CORIA.
JULIO 1955	CONDICIONES GEOLOGICAS DE LA BOQUILLA DE LA ZURDA, SOBRE EL RIO VERDE, EDO. DE JALISCO.	ING. ALFONSO DE LA O. CARRERO.
JULIO 1955 MEMO. 13-5-58	RECONOCIMIENTO GEOLOGICO DE LA BOQUILLA DE LA ZURDA, EN EL RIO VERDE, AFLUENTE DEL RIO SANTIAGO, JALISCO.	ING. HEINZ LESSER JONES.
AGOSTO 1955	PRESA LA ZURDA, JALISCO. INFORME DE AVANCE DE CONSTRUCCION.	
	INFORME PRELIMINAR SOBRE LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES DE LA CIMENTACION DE LA CORTINA.	ING. RAUL J. MARSAI.
JULIO 1956	INFORME PRELIMINAR ACERCA DE LAS CONDICIONES GEOLOGICAS DEL SITIO INFERIOR DE "LA ZURDA", RIO VERDE, JALISCO.	ING. MANUEL ALVAREZ CARVAJAL.
10 FEBRERO 1958	INFORME DE LA VISITA A LA OBRA DE LA PRESA LA ZURDA.	A. BENASSINI - D. VEGA A. LESSER Y MARSAI.
14 JULIO 1970 MEMO. 5/70.	REVISION DE LAS CONDICIONES GEOLOGICAS DE LA PRESA LA ZURDA.	JOSE VICENTE OROZCO
11 AGOSTO 1970 MEMO TECNICO 5.1-108	INFORME VISITA DE INSPECCION, PRESA LA ZURDA.	A. BENASSINI - J.V. OROZCO - H. LESSER J.
DICIEMBRE 1974	INFORME GEOLOGICO ADICIONAL SOBRE EL RESULTADO DE LAS EXPLORACIONES Y PRUEBAS DE PERMEABILIDAD EN LA BOQUILLA DEL PROYECTO "LA ZURDA", SOBRE LA BARRANCA DEL RIO VERDE, MPID. DE VILLA CEREBON, EDO. DE JALISCO.	ING. JESUS ESCOBAR MARTIN.

FECHA	NOMBRE DEL ESTUDIO	AUTOR
9 ABRIL 1974 MEMO. 4.4.4./ZSB	INFORME CONDICIONES GEOLOGICAS, SITIO LA ZURDA.	ING. LUIS HERNANDEZ TORRENS.
JULIO 1980 MEMO. 101 AT- 2-33	INFORME "LA ZURDA".	ING. A. BENASSINI.
FEBRERO 1981 CIRC. 3.1.1.4.012	INSPECCIONES REALIZADAS AL SITIO DE LA ZURDA, JALISCO.	J. JESUS PLIEGO MARTINEZ.
MAYO 1982	INFORME GEOLOGICO SOBRE LOS RESULTADOS DE LAS EXPLORACIONES Y PRUEBAS DE PERMEABILIDAD EN LA BOQUILLA DEL PROYECTO "LA ZURDA", EJE No. 3, SOBRE EL RIO VERDE, MPID. VILLA OREGON, EDO. DE JALISCO.	ING. ANDRES SILVA ESCOBEDO.
OCTUBRE 1984	INFORME DE LA RECOMPILACION Y ANALISIS DE INFORMACION ACERCA DE LAS CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DEL SITIO LA ZURDA, SITIO INFERIOR Y SITIO SUPERIOR, SOBRE LA BARRANCA DEL RIO VERDE, JALISCO.	ING. F. JAVIER SANCEN CONTRERAS.
1985	REUNION DE TRABAJO EN LAS OFICINAS DE LA REPRESENTACION EN GUADALAJARA, JALISCO, SOBRE LOS RESULTADOS DE LAS EXPLORACIONES GEOLOGICAS DE LA PRESA "LA ZURDA", RIO VERDE.	ING. CARLOS GARCIA HERRERA.

### 1.4.3 Resultados

Se presenta en breve resumen de los principales aspectos geologico-geotécnicos de los estudios anteriores:

- **Geología General.**- De acuerdo con Ortiz (1949), los materiales o depósitos lacustres del área regional y local, se acumularon en una antigua cuenca cerrada, cuyo basamento consiste en potentes corrientes riolíticas. Sancén (1984) menciona que la cuenca lacustre fue formada por la Drogenia Cascadiana.

Las descripciones hechas para el Eje 1 por Ortiz (1949), Lesser (1955), De la O. Carreño (1955) y Escobar (1974) son equivalentes. Alvarez (1956) se refiere al eje inferior (1) en donde reporta como novedad potentes costras de caliche en la margen derecha.

Silva (1982) reporta los resultados del Eje 3 en donde la secuencia litológica es la misma que para los Ejes 1 y 2, mientras que la sección de la boquilla es topográficamente asimétrica al ser la margen derecha de mayor pendiente. Sancón (1984) recomienda estudiar el Eje 4, a 800 m aguas arriba en donde no hay basaltos.

- **Estratigrafía - Petrología.**- La unidad más antigua que aflora en el área de los proyectos ha sido descrita como toba arenosa (Lesser, 1955; De la O. Carreño, 1955), como toba lacustre (Alvarez, 1956; Escobar, 1974; García, 1985) y como arena pumítica (Marsal, 1955), a la cual se le ha denominado Unidad III. Consiste de una unidad masiva de espesor estimado mayor de 120 m, con pseudoestratificación local y que forma pendientes de ladera de 45 - 90 grados. Presenta una textura fina, consolidación moderada y concreciones calcáreas.

De acuerdo con De la O. Carreño (1955), esta unidad consiste de 70% arena y 30% arcilla, con porosidad moderada y aflora abajo de la cota 1675 m en casi toda el área. El contacto inferior no se conoce, mientras que el superior es concordante con la unidad intermedia.

Sobreyaciendo a las tobas lacustres se encuentra una intercalación de estratos delgados de arenas finas, arcillas, margas, calizas de agua dulce y horizontes de sílice amorfo, que se ha denominado Unidad II. El espesor del paquete es de 60 a 100 m (Marsal, 1955; Silva, 1982; García, 1985). De la O. Carreño (1955) la describe como: 76% de bentonita, 11% de calcita y 3% de cuarzo. Lesser (1955) también afirma la presencia de horizontes bentoníticos. En 1956, Carbajal describió la unidad como arcillas de poca resistencia, tobas calcáreas resistentes y de probable origen evaporítico; Sancón (1984), también le asigna un origen evaporítico a los horizontes calcáreos. Esta unidad está estratificada, con contactos que varían de espesor desde 0.1 m hasta 2.2 m en el Eje 1 (Ortiz, 1949) y de 0.1 a 0.7 m en el Eje 2 (Silva, 1982 y Escobar, 1974).

Los fragmentos individuales presentan fenocristales de cuarzo, feldespatos, biotita y anfíboles en una matriz holohialina (Ortiz, 1949). Su contacto inferior está marcado por un horizonte de sílice, mientras que el superior es discordante con los basaltos.

Los derrames basálticos tienen un espesor promedio de 25 m (De la O. Carreño, 1955) y se presentan formando escarpes en las partes altas de los cañones y han sido designados como Unidad I, aproximadamente a 90 m del cauce (Ortiz, 1949). Su extensión abarca alrededor de 5 km<sup>2</sup> en las partes altas topográficas y en la porción SW del área. Estos derrames se encuentran fracturados en columnas, sin que se aprecie un efecto tectónico posterior a su emplazamiento, aunque Lesser (1955) los reporta de diferentes niveles topográficos.

Los depósitos aluviales en el Eje 2 son de 7.1 m, según Escobar (1974) y de 7 a 3 m según Alvarez (1956) y en el Eje 3 son de 7.5 m (Silva, 1982); de donde se concluye la consistencia en el espesor del depósito fluvial.

Los depósitos de talud en el Eje 2 son de 15 m en margen derecha y de 9.6 m en margen izquierda (Escobar, 1974); Alvarez (1956) reporta en el Eje inferior (2) escombros de talud de 12 m de espesor.

- **Geología Estructural.**- Ortiz (1949) indica que a pesar de la actitud horizontal de todas las unidades, se han formado fracturas con 44 grados de inclinación en los depósitos de talud. Esto sugiere que es el ángulo de reposo de estos materiales. De la D. Carreño (1955) también enfatiza que sólo se han observado pequeñas fallas y pliegues locales que afectan principalmente las unidades sedimentarias. Entre los sistemas de fallas reportados están N 75 grados E; N 46 grados E y N 44 grados W, con desplazamientos de 4.2, 4.8 y 7.4 m, respectivamente (Carbajal, 1956). Alvarez (1956) encontró en el Eje 2 fracturas en la arenisca, selladas por silicificación incipiente. Regionalmente, los contactos entre las unidades buzcan ligeramente río abajo. Sancen (1954) indica que buzcan con 3 grados, García (1985) establece una diferencia de 17 m entre el Eje 1 y el Eje 3. Carbajal (1956), sin embargo, indica que el buzamiento es hacia aguas arriba, apenas perceptible.

Lesser (1955) atribuye las diferencias en los niveles de los derrames de basalto a la Tectónica Cascadiana por fallamiento de bloques; sin embargo, estas dislocaciones no afectan a los depósitos lacustres inferiores por lo que se puede aseverar que el tectonismo no afectó a la región en cuestión.

Según Ortiz (1949), en el área los sismos son escasos, los epicentros más cercanos se encuentran al SW a 76 y 92 km de distancia. Las zonas de actividad neovolcánica corresponden al Volcán de La Higuera, Acatic y la zona Tesislán-Zapopan, de donde se reportaron intensidades VII en la escala de Mercalli modificada.

- **Materiales para Construcción.**- En los estudios precedentes se han visualizado las áreas potenciales de explotación para algunos de los materiales de construcción.

Ortiz (1949) propone que los basaltos próximos a la boquilla sean triturados. Escobar (1974) menciona la presencia de basaltos en ambos márgenes para enrocamiento, bancos de grava-arena en el cauce del río y arcillas a 2.5 km aguas abajo sobre el cauce del río.

- **Perforación y Pruebas de Permeabilidad.**- Las exploraciones de campo que se efectuaron en el proyecto La Zurda fueron realizadas en tres etapas, que a continuación se resumen, en ellas se practicaron pruebas de permeabilidad tipo Lugeón y Lefranc.

AÑO	EJE	No. DE EXPLORACIONES	METROS LINEALES
1949	2	7	287
1974	2	6	240
1982	3	7	495

El siguiente cuadro resume los promedios de recuperación y RQD de los sondeos de los Ejes 2 y 3.

EJE	UNIDAD	LITOLOGIA	REC (%)	RQD (%)	REFERENCIA
3	I	basalto	61	25	Silva, 1982
2	II	toba arcillosa	71	-	Escobar, 1974
3	II	toba arcillosa	37	42	Silva, 1982
2	III	toba arenosa	51	-	Escobar, 1974
3	III	toba arenosa	12	11	Silva, 1982

Los resultados de las pruebas de permeabilidad efectuadas, en los Ejes 2 y 3 se resumen en el siguiente cuadro:

EJE	UNIDAD	PRUEBA LEFRANC K (cm/s)	PRUEBA LUGEN (U.L.)	REFERENCIA
1	II	$1.7 \times 10$ (exp -5) a $6.4 \times 10$ (exp -7)	0.6 a 22	Escobar, 1974
1	II	$2.7 \times 10$ (exp -6)	2	Sancén, 1984
3	II	$1.9 \times 10$ (exp -5)	0.6 a 27	Silva, 1982
1	III	$1.7 \times 10$ (exp -4) a $6.7 \times 10$ (exp -7)	0 a 2	Escobar, 1974
1	III	$4.7 \times 10$ (exp -6)	0.74	Sancén, 1984
3	III	$7.5 \times 10$ (exp -3) a $5 \times 10$ (exp -6)	0 a 35	Silva, 1982

Unidad II = Toba arcillosa estratificada

Unidad III = Toba arenosa masiva

NOTA: Marsal (1955) reporta de análisis en laboratorio  $K = 2.5$  a  $7.6 \times 10$  (exp -4) cm/s para la toba arenosa. Sin embargo, los resultados no se consideran representativos de las condiciones medias de los materiales que soportaran la presa y de la incertidumbre de la localización de las muestras (Sancén, 1984).

Sancén (1984) concluye que ambas unidades tienen una permeabilidad primaria que se clasifica como impermeable, reportándose localmente como zonas con alta permeabilidad secundaria en la Unidad III, desarrollada por alteración o fracturas que no han sido definidas en la superficie dado el carácter físico de la Unidad suprayacente, que "absorbe" los desplazamientos que pudieran existir en la Unidad II por fallas o fracturas de corto salto vertical.

Asimismo, Sancén menciona que en los trabajos de excavación del corazón impermeable, se reportaron filtraciones en la Unidad III, con localización puntual, produciendo arrastre de partículas de arena de la formación, estableciéndose el riesgo de tubificación en la unidad.

García Herrera (1985) menciona que las pruebas de permeabilidad efectuadas, solamente en las campañas 1980-1982, muestran que la unidad III es en general poco permeable a impermeable, a excepción en partes del cauce del río en el Eje 3, donde debe haber permeabilidad por fracturas.

En general en los primeros 5 m a partir de la superficie no es posible levantar más de 2.5 kg/cm<sup>2</sup> sin romper la roca. Se considera que esta zona es de decompresión e intemperismo del macizo. Hasta los 10 ó 15 m la roca sólo se puede probar con 5 a 8 kg/cm<sup>2</sup>, considerándose el máximo espesor del área de decompresión. (Este dato no es muy claro en todos los casos analizados, pues en algunos aparentemente no se llegó a la presión crítica en las pruebas).

De los 15 m en adelante y en zonas sanas, no fracturadas (correlacionadas por la permeabilidad), es factible levantar más de 10 kg/cm<sup>2</sup> sin romper la roca, considerándose roca sana sin estar afectada por la liberación de esfuerzos y ayudada por el confinamiento. Estos datos son del Eje 3 y en la Margen Izquierda del Eje 2, pues en éste se hicieron pruebas de permeabilidad LeFranc en el lecho del río y Margen derecha.

Alvarez (1956) consideró que la permeabilidad por porosidad de la Unidad III, del Eje 2, sería de 0.05 lt/m<sup>2</sup>/s, con una velocidad de infiltración de 0.432 m/día, concluyendo que la roca es de saturación lenta.

- **Excavaciones Subterráneas.**- En el Eje 2 se excavaron, en 1949, ocho túneles con un desarrollo total de 135 m y un pozo a cielo abierto en uno de ellos, de donde se concluye que los socavones de sección de 2 x 2 m con bóveda plana, sin ademe, son estables al no presentar casi derrumbes o caídos desde 1955 a la fecha.

- **Mecánica de Rocas.**- Este tipo de estudios se practicaron en muestras inalteradas colectadas en los túneles 1 y 4 del Eje 1 para determinar la resistencia de los materiales de la unidad III (toba arenosa no estratificada) en donde quedará cimentada la cortina (Marsal, 1955).

Resultados para la toba arenosa:

densidad relativa = 2.4 ton/m<sup>3</sup>  
 contenido de agua = 19%  
 relacion de vacios = 0.8  
 grado de saturacion = 60%  
 resistencia a la compresion simple = 16.3 - 23.5 kg/cm<sup>2</sup>  
 coeficiente de permeabilidad = 2.5-7.6 x 10 (exp -4) cm/s  
 resistencia al esfuerzo cortante = 10 kg/cm<sup>2</sup>

De estos resultados Marsal (1955) concluye que la toba arenosa es de muy baja compresibilidad y de permeabilidad aceptable para una cortina de materiales graduados de 65 m de altura con taludes 2 : 1, con un factor de seguridad mayor de 3 para resistencia al esfuerzo cortante, ya que la cortina generaria esfuerzos de corte del orden de 2.9 kg/cm<sup>2</sup>.

- Anteproyectos.- El siguiente cuadro resume las características de los anteproyectos de la presa "La Zurda":

P R O Y E C T O									
C O R T I N A							V A S O		
V E R T E D O R									
REFERENCIA	ALTURA (m)	LONGITUD CORONA (m)	TALUD PAROS	ELEV. (m)	CAPAC. (m <sup>3</sup> /s)	DESFOGUE O DESVIO (m)	AREA (ha)	VOLUMEN (10 m <sup>3</sup> )	EJE
Grtiz, 1947	60	225	-	-	-	-	1900	475	
Lesser, 1955	65	235	-	1705	-	-	-	625	
Carreño, 1955	65	-	-	-	1300	1620	-	625	1
Marsal, 1955	65	-	2 : 1	1708	1300	-	-	560	
Escobar, 1974	65	250	-	-	-	-	-	625	

## 1.5 METODOLOGIA DE TRABAJO

Las actividades desarrolladas se pueden resumir, en forma general, en los siguientes conceptos:

1. Recopilación, selección y análisis de información geológico-geotécnica.
  - 1.1 Información del Proyecto La Zurda.
  - 1.2 Información de la Geología Regional.
  
2. Estudio Geológico del Cañon.
  - 2.1 Estudio fotogeológico.
  - 2.2 Cartografía geológica de campo.
  - 2.3 Medición y muestreo de secciones estratigráficas.
  - 2.4 Estudio petrográfico-petroológico.
  - 2.5 Estudio de propiedades mecánicas y dinámicas.
  - 2.6 Clasificación geotécnica de las unidades.
  - 2.7 Análisis geotécnico.
  - 2.8 Informe Técnico.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

### 2.1 FISIOGRAFIA

La zona de estudios se ubica en la porción meridional de la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, dentro de la Subprovincia de Mesetas y Cuencas (Raisz, 1964); pero en los límites con las provincias fisiográficas de la Meseta Central hacia el Oriente y el Eje Neovolcánico hacia el Sur (Figura 2.1). Esta zona se ha considerado inclusive por algunos autores como de transición (Nieto, et. al 1981)

La Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental se caracteriza por una secuencia de rocas ignimbríticas y tobas del Terciario Medio y Superior, eventualmente cubiertas por depósitos lacustres de espesores insignificantes en comparación con las rocas volcánicas.

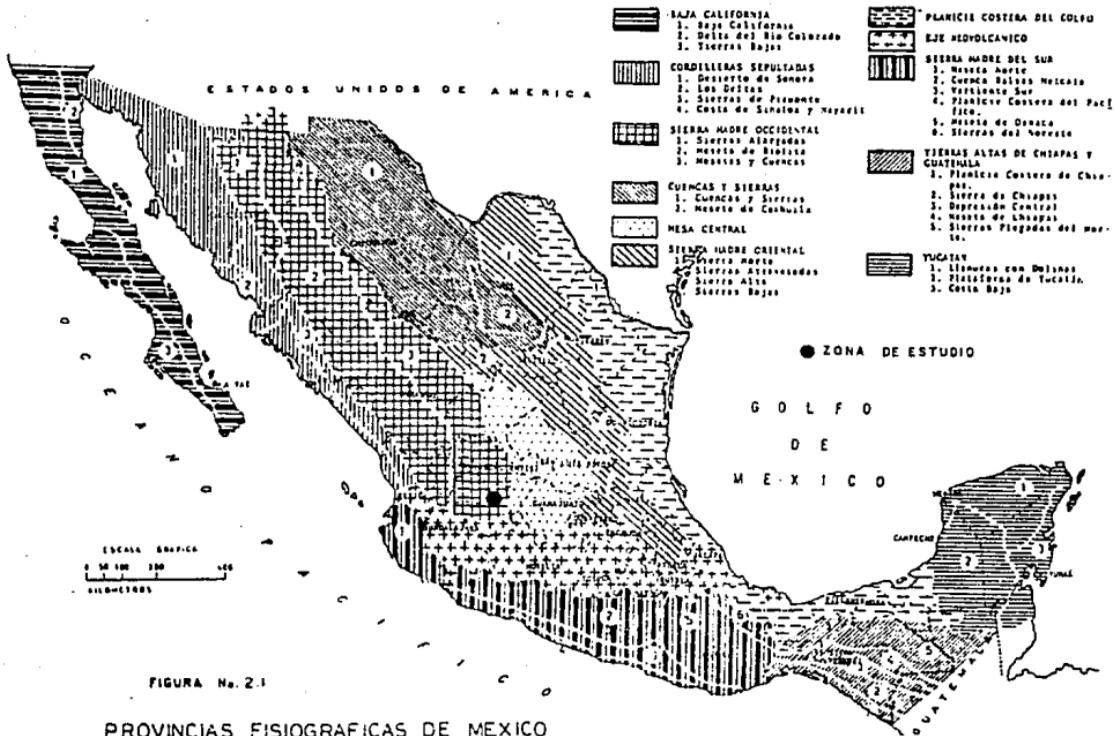
Hacia el occidente del área de estudio, la zona presenta una abrupta topografía por el principio del Cañón del Río Grande de Santiago, mientras que hacia el Oriente la topografía se vuelve muy suave.

La zona de estudio forma parte de uno de los valles formados tectónicamente de la Sierra Madre Occidental, con una orientación NNE-SSW donde se depositaron sedimentos lacustres. Las rocas se encuentran dispuestas horizontalmente y no se han observado estructuras plegadas y parte por la edad de estas (Plioceno) se le han considerado de un ambiente de relativa estabilidad estructural (Nieto et. al 1981).

Por otro lado, la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico está constituida de rocas predominantes andesíticas y cantidades subordinadas de rocas ácidas y básicas de edad Plio-cuaternarias y que, más aun, la mayor actividad volcánica se efectuó durante los últimos 2 millones de años (Demant, 1978). La zona se encuentra a una altura de 1700 m.s.n.m.

La fisiografía que se presenta en la zona de estudio corresponde en su parte central y norte a una extensa meseta disectada por el Río Verde y sus afluentes, resultado del rejuvenecimiento de una gran cuenca lacustre de origen tectónico, dando una morfología de lomeríos suaves con un patrón de drenaje de tipo dendrítico, con algunos cañones donde se encuentran rocas basálticas coronando.

La porción noroeste, sur y sureste esta caracterizada por la existencia de un relieve abrupto representado por mesetas volcánicas de rocas riolíticas, intensamente disectadas y drenadas por corrientes, dispuestas en patrones subparalelos originados por el control estructural que ejercen las fallas y fracturas plioceno-cuaternarias sobre el drenaje; por encima de las mesetas se encuentran conos volcánicos basálticos con una distribución irregular en la zona de estudio.



En particular el área del vaso del Proyecto "La Zurda" podría dividirse en términos generales, en tres zonas fisiográficas:

- **Zona de lomeríos suaves.**- Se extiende desde el sitio de Apánico hacia aguas arriba del Río Verde; se caracteriza por una morfología suave y amplias terrazas aluviales a los lados del río, principalmente después de la población de San Nicolás donde se extiende el valle. Se encuentran muy pocos escarpes verticales formados por rocas suaves.

- **Zona parcialmente encañonada.**- Abarca desde el sitio "Apanico", hacia aguas abajo, y hasta el cañón de La Zurda, en esta zona el Río Verde presenta un estrechamiento parcial con laderas de mayor inclinación, más cerca del cauce, y con terrazas más reducidas. Esto es debido a que en la margen izquierda se llega a presentar una colada basáltica de mayor resistencia.

- **Zona encañonada.**- Esta zona la constituye propiamente el cañón de La Zurda, el cual fisiográficamente contrasta con las zonas antes descritas por formarse un cañón de 300 m de ancho, en una longitud de 5000 m y pendientes fuertes, debido a que se presenta una colada de lava basáltica en ambas márgenes del río, la cual ha resistido más a los agentes de erosión.

## 2.2 ESTRATIGRAFIA

La región de estudios se ubica en una zona que se puede considerar de transición geológica, donde se han reconocido dos ciclos volcánicos de gran importancia; uno del período oligo-mioceno y el otro del plio-cuaternario (Demant, 1978). Las rocas más antiguas están constituidas principalmente de andesitas, dacitas, riolitas e ignimbritas, que en ocasiones se observan plegadas en diferentes partes de los estados de Jalisco y Nayarit (Nieto 1985). Esta secuencia se le ha asociado a las rocas que han dado origen a la Sierra Madre Occidental y se han considerado como la provincia ignimbritica más grande del mundo (Clabaugh, 1972) y que en el Estado de Jalisco cubre una zona muy extensa. Por otro lado, las rocas más jóvenes se les han asignado al Eje Neovolcánico y que consisten fundamentalmente de una actividad calco-alcalina.

Como se puede observar en el plano geológico regional 2.1 la zona de estudio se ubica en una zona formada por un graben de grandes dimensiones formado por rocas andesíticas y riolíticas, donde se depositaron materiales volcánicos piroclásticos y rocas sedimentarias lacustres intercaladas con colados de basalto. En los alrededores de la zona y coronando las zonas topográficamente altas, descansan coladas basálticas más jóvenes, así como conos volcánicos de basalto como son el cerro de San Miguel hacia el Suroeste y el cerro La Joya hacia el Oeste de la zona de estudio.

Cabe aclarar que desafortunadamente no se han realizado estudios geológicos detallados en el área que nos ocupa, limitándose estos a la porción sur de la Sierra Madre Occidental o genericamente al Eje Neovolcánico, Deste y Sur del área que nos ocupa; motivo por el cual la información recolectada fue reducida.

En la Figura 2.2 se muestra la columna geológica de la zona de estudio. A continuación se describen las formaciones geológicas cercanas al área de estudio, de la más antigua a la más joven.

#### - Tobas e Ignimbritas Ácidas Terciarias, (Ig).

Esta unidad la constituye una alternancia irregular de riolitas, tobas e ignimbritas de composición principalmente ácida, y en ocasiones intercaladas por derrames andesíticos y basálticos. Las ignimbritas son fundamentalmente vítreas y se presentan variaciones desde muy bien soldadas hasta tobas poco soldadas. También en otras ocasiones son líticas, de composición intermedia (andesitas). En la mayoría de los casos presenta una textura porfídica.

El contacto inferior en la zona de estudio no se observó, sin embargo se supone que tenga un espesor mínimo de unos 500 m, por los reportes existentes en sitios cercanos. Por otro lado, a esta unidad la cubre una secuencia tobácea arenosa pumítica de la unidad lacustre (Ts-La).

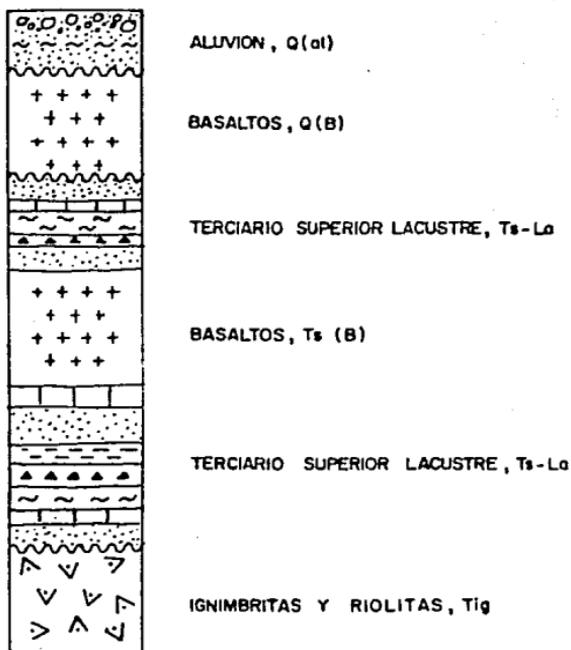
De acuerdo a su posición estratigráfica y por los estudios radioactivos que indican una edad del orden de 28 m.a., a esta unidad se le ha considerado del Oligoceno-mioceno inferior (Nieto, 1985).

#### - Terciario Superior Lacustre, Ts-La.

Esta unidad no ha sido descrita formalmente, tan sólo se ha mencionado en algunas tesis profesionales, mientras que DETENAL en su cartografía 1:250,000 la cataloga como depósitos lacustres, y en su cartografía 1:50,000 la mapea genéricamente como calizalutita.

El paquete se compone por una secuencia de materiales estratificados compuestos por materiales de diversos orígenes: lacustre, fluvio-lacustre, fluvial, tobácea e híbrido.

En general se manifiesta un gran aporte de material de origen volcánico en toda la secuencia. Así es como se distinguen conglomerados, areniscas, limos, arcillas, calizas y pedernales, así como ceniza y lapilli depositados en cuerpos de agua y en áreas secas.



**Fig. 2.2 - COLUMNA GEOLOGICA REGIONAL**

En terminos generales se puede mencionar que la base de la secuencia son unos conglomerados riolíticos-ignimbriticos, sobre los que descansa un grueso paquete masivo de Areniscas pumiticas, al que a su vez le sobryace una unidad estratificada en la que se incluyen calizas, pedernales, arcillas, limos y areniscas.

Intercalados en este paquete se encuentran algunas coladas de basaltos y andesitas, los cuales se tratan por separado, Ts (B).

Sobre los basaltos, normalmente se observa lapilli y ceniza depositados en agua y sobre estos un paquete masivo de limos-amarillo verdoso, algunos horizontes de pedernal, caliza y otros paquetes de ceniza y lapilli; sobre los que copetean areniscas verdosas fluviales y fluvio-lacustres.

La secuencia completa no fue observada en ningún lugar del vaso, en general los materiales depositados antes de los basaltos afloran en la mitad sur del area, mientras que la secuencia depositada sobre los mismos aflora en la mitad norte.

El espesor de esta unidad es del orden de los 200 metros y sobre esta se encuentran basaltos cuaternarios o bien se han depositado materiales clásticos continentales como son de acarreos, terrazas aluviales y talud.

La edad en esta secuencia debe ocupar un rango amplio en el Terciario Superior; debido a que se tienen edades radiométricas de las ignimbritas y basaltos, la secuencia inferior tiene una edad entre los 28 y 10 m.a., mientras que la secuencia estratificada superior es más joven, por lo que al paquete se le considera del Mioceno Superior-Plioceno.

#### - Terciario Superior Basaltos, Ts (B).

Intercalados en la secuencia del Terciario Superior Lacustre o descansando sobre las ignimbritas y riolitas, se encuentran coladas de andesitas y basaltos. En general son de color negro o gris obscuro o bien se muestran hematizadas por alteración posterior a su depósito, son de grano fino y muestran cristales de olivino fresco o iddinsitizado; las coladas individuales llegan a tener espesores de hasta unos 25 m, y en ocasiones se tienen varias coladas separadas por horizontes de unos 80 cm de paleosuelos recocidos por las emisiones que los cubren.

Son emisiones con origen en aparatos volcanicos o bien de fisuras. Algunos de los aparatos mayores son el cerro San Miguel y el cerro La Joya, así como el cerro San Diego en las inmediaciones de San Juan de los Lagos. Algunas estructuras de fisuras se localizaron en las inmediaciones de Santa Barbara, al Sur de Teocaltiche.

Con base a dataciones que efectuó Nieto (1981) en muestras obtenidas en el cerro San Miguel y Mesa Toyahua, al Oeste del área, que arrojaron edades de  $10.52 \pm 0.22$  y  $10.96 \pm 0.57$  millones de años, se les asignó una edad de Plioceno Medio. Posiblemente se correlacione con unos diques basálticos observados en el área de Nayarit-Jalisco por Nieto (1981).

Se interpreta que de acuerdo a su mineralogía (ver capítulo 5.3) estos materiales sean de tipo toleítico y sus emisiones, posiblemente sean respuesta a evento extensional relacionado a la apertura del Golfo de California.

#### - Cuaternario Basaltos, Q(B).

Distribuidas en toda la región se encuentran algunas coladas de basaltos negros y gris oscuro, de grano fino, densos, en ocasiones vesiculares y amigdaloides.

Se presentan en coladas que abarcan algunos kilómetros cuadrados y tienen origen en aparatos cónicos o bien son derrames de fisuras.

En general tienen las mismas características texturales y estructurales que las lavas terciarias, aunque localmente se muestran ligeramente más fracturadas.

Descansan sobre los sedimentos lacustres o sobre las ignimbritas, posiblemente estas emisiones se puedan correlacionar con los eventos calco-alcalinos del Eje Neovolcánico.

#### - Aluvión, Q (A1).

Se trata de material detrítico que se ha acumulado en los cauces de las corrientes principales y secundarias, así como en sus inmediaciones.

Lo componen acarreos formados por cantos redondeados, de rocas ígneas extrusivas, arenas y limos que se han depositado en los lechos de los ríos, también incluye material limo-arenoso y arcillas que conforman las terrazas aluviales en las inmediaciones de las corrientes. Estos materiales descansan sobre todas las litologías presentes en la región y son producto de la erosión, transporte y depósito de rocas preexistentes. Se les asigna una edad reciente.

## 2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL.

A fin de comprender la Geología Estructural de la región primeramente se realizó un análisis estructural, tomando como referencia la orientación de estructuras en un área de 90 por 95 km, tomada de una ampliación a escala 1:500,000 a partir de imágenes de satélite ERTS, escala 1:1,000,000. Los principales alineamientos se muestran en la Figura 2.3 y la orientación preferencial de las estructuras se puede analizar en la Roseta de Fracturamiento Regional de la Figura 2.4. En dicha figura se observa que el principal sistema (ALFA), tiene una orientación que varía de NE 30 a NE 50 grados, con un máximo en NE 45 grados.

Lo anterior es importante pues el área de estudio queda comprendida en la porción Sur del Graben de Aguascalientes, el cual tiene un ancho aproximado de 50 km (Plano 2.1) y la orientación preferencial de las fallas normales que delimitan el graben, es de NE 30-40 grados; lo que coincide con la dirección de otros grabens de la región, como los de los ríos Juchipila y Tlaltenango, aunque éstos son de una anchura más reducida (de 10 a 15 km), muy próximos al área de estudio; regionalmente estas estructuras son típicas de la porción Suroeste de la Sierra Madre occidental, en su límite con la Mesa Central.

Se puede decir que, en general, dentro del graben las corrientes de agua fluyen en una dirección preferencial NE-SW, aunque los escurrimientos pueden tener muy diversas orientaciones. Otros alineamientos que conservan la misma orientación son las estructuras volcánicas de los cerros de San Diego (en la proximidad de San Juan de los Lagos) y el volcán alrededor a Jalostotitlán, así mismo sobre esta línea también se encuentran localizadas otras coladas basálticas, cuyo origen pudiesen ser de fisuras no mapeadas.

El extremo sur del graben, no se manifiesta como una línea recta, sino que se muestra como un sistema de fallas (también normales) en el que se tienen orientaciones: NE 65 y SE 60; el sistema da apariencia de un escalonamiento.

Un aspecto estructural importante de señalar, es que el origen de las coladas basálticas y andesíticas en la región (tanto terciarias como cuaternarias) está relacionada a estructuras tanto cónicas (cerros San Miguel, La Joya, San Diego y muchos otros más) como a fisuras, las cuales no se han mapeado por estar generalmente cubiertas.

Por otro lado, resalta el hecho de que la mayor parte de las coladas lávicas basálticas andesíticas se encuentra cubriendo a las ignimbritas y tobas ácidas así como riolitas, mientras que la menor proporción cubre sedimentos lacustres.

ORIENTACION DE ESTRUCTURAS REGIONALES MAPEADAS EN IMAGEN DE  
SATELITE 'ERTS'

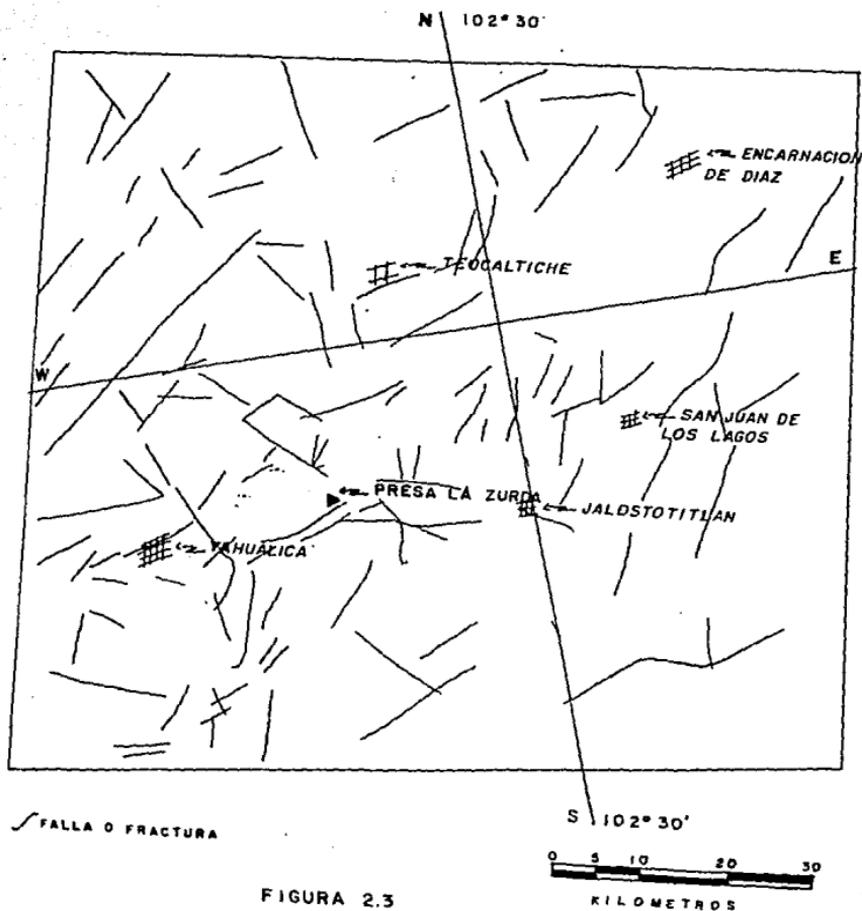
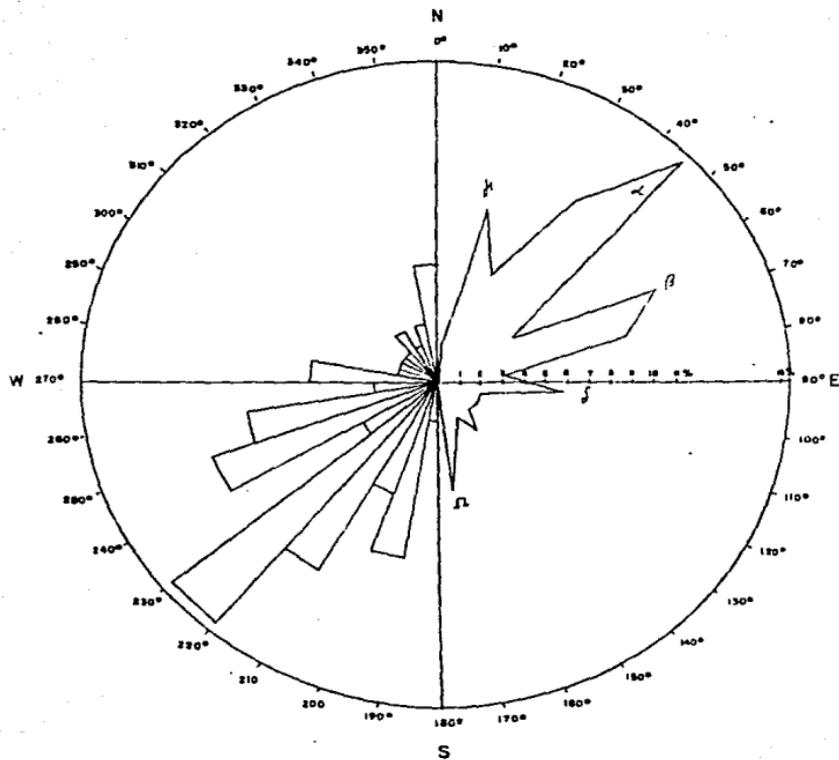


FIGURA 2.3

# ROSETA DE FRACTURAMIENTO REGIONAL



Sistema

Dada A

Porcentaje

16 %  
11 %  
9 %  
6 %  
6 %

Estructuras

21(+14)  
15(+11)  
11  
8  
8

Orientación

45°  
65°  
15°  
95°  
175°

UNIVERSO 127  
ESTRUCTURAS

Figura 2.4

## 2.4 TECTONICA.

La zona de estudio se ha visto afectada por fenómenos tectónicos regionales que pueden ser identificados a partir del Terciario y hasta el Cuaternario. Por tanto, a continuación se da una breve reseña de los fenómenos acontecidos a partir del Terciario en la porción sur-sureste de la Sierra Madre Occidental, conforme a la interpretación que da Nieto (1980) para esta zona:

Durante el Terciario Medio, el Oligoceno y Mioceno se caracterizan por un vulcanismo calcoalcalino, primero andesítico-riolítico y después riolítico-ignimbritico. En efecto, la litología principal expuesta en la Sierra Madre Occidental, en general, consiste de ignimbritas con espesores, en ciertos lugares, hasta del orden de 1000 m. La actividad volcánica que dio origen a estas rocas puede ser interpretada como típica de una zona de "rift" atrás de un arco volcánico por reacción de la corteza a los movimientos de subducción. De esta manera, el magma nace de una zona de fusión de la corteza continental sobre la zona de Benicoff, pudiendo coexistir en una misma época un vulcanismo de tipo compresión (andesitas) y un vulcanismo distensivo (ignimbritas).

Durante el período Mioceno Medio se da lugar a un complejo patrón de fases compresionales y distensivas, esto dio como resultado el plegamiento de la secuencia del Oligoceno-Mioceno temprano en una amplia zona de Nayarit y Jalisco, probablemente a consecuencia de un empuje proveniente del oeste; se ha observado que la intensidad de la deformación disminuye hacia el oriente hasta el Valle del Río Tlaltenango (Zacatecas); por lo que más al este la deformación prácticamente está ausente (Nieto, 1985). Este fenómeno tuvo lugar en un intervalo que va de 10 a 15 m.a. y estuvo seguido del emplazamiento de diques basálticos (y posiblemente coladas lavicas, al oriente). Todos estos eventos sucedieron en la época en que la Junta Triple (unión de las placas pacífica, rivera y americana, Figura 2.5), que migraba paulatinamente al Sur, dejaba sentir sus efectos no solo en el cese del magmatismo sino en la presencia de una tectónica de distensión en la parte final de este período. En este tiempo se dejan sentir los primeros movimientos de la apertura del Golfo de California.

Más tarde, en el intervalo de 10-5 m.a. las placas sufrieron un reordenamiento a causa de un cambio de posición y orientación de la Dorsal del Pacífico, que tiene como consecuencia el emplazamiento de una suite bimodal manifestada por ignimbritas y andesitas basálticas del Mioceno Tardío al Norte de Guadalajara.

Finalmente ocurre otro evento magmático ahora relacionado con el Eje Neovolcánico, desde hace cuatro millones de años y hasta el presente, que se manifiesta inicialmente por la emisión de brechas laháricas y esporádicos derrames basálticos en su base (4-2 m.a.); así como por derrames andesíticos y riolíticos formadores de volcanes (2 - 0 m.a.) que representan el reinicio de la subducción, posterior al brinco de la Dorsal Pacífico.

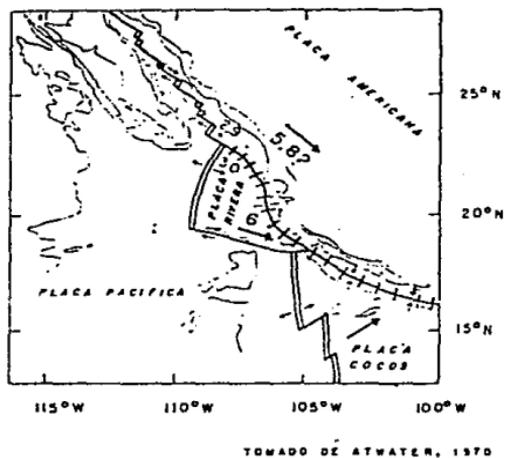


Figura 2.5 Tectónica de la Costa Pacífica de México.

Al relacionar los eventos tectónicos con los rasgos geológicos de la región se desprende lo siguiente:

- a) El basamento de ignimbritas ácidas mapeado en el área es producto de emisiones de Terciario Medio como respuesta a una tectónica distensiva.
- b) La formación de la fosa tectónica del Graben de Aguascalientes posiblemente es respuesta a los movimientos del Mioceno Medio relacionados con el inicio de la apertura del Golfo de California.
- c) Una vez que inicia el hundimiento del Graben de Aguascalientes se forman cuencas lacustres con el consiguiente depósito de materiales fluviales, lacustres, piroclásticos e híbridos en la región.
- d) Es posible que las coladas andesíticas y basálticas mapeadas como terciarias sean efectos, también, de los primeros movimientos que a la postre provocaron la apertura del Golfo de California.
- e) Después de la emisión de las coladas terciarias, continúa el azolve de la cuenca lacustre.
- f) Los eventos magmáticos del Eje Neovolcánico están representados en la región por los basaltos cuaternarios y posiblemente por algunas emisiones de ceniza y lapilli. También es posible relacionar estos fenómenos con un rejuvenecimiento regional, que está causando una fuerte disectación del área y un parcial desazolve del Graben de Aguascalientes.

## 2.5 RIESGO SISMICO

A partir del Análisis Geológico Regional (Plano 2.1) y de la interpretación de las imágenes de satélite Ertz (LL-6) de fecha feb/10/73 y cartografía de cartas F13-9 de CIGDETENAL, se interpreta que dentro de la zona en cuestión, nueve discontinuidades o fallas del terreno en el pasado geológico estuvieron asociados a sismos, por lo que se calculó el desplazamiento (D) de las fallas enlistadas a partir de la erucción de Borilla (1970) usando la longitud (L) del fallamiento en superficie de:

$$\text{Log D} = 0.86 \text{ Log L} - 0.46$$

Para evaluar la magnitud del sismo asociado a este fallamiento se utilizó la ecuación publicada por King y Knopoff (1968, p.253).

$$M = 1.4 + \text{Log} (LD^2)/1.9$$

en donde la magnitud "M" se calcula a partir del desplazamiento "D" y de la longitud "L" de una falla.

Posteriormente, se midió la distancia "R" al Cañon de La Zurda para evaluar el coeficiente de riesgo sísmico por la ecuación de Campbell (1983), para sismos cercanos a menos de 50 km de distancia al sitio:

$$g = (0.0185 \exp(1.28M)) (R + 0.147 \exp 0.732M) \exp(-1.75)$$

Tabla 2.1 Evaluación de aceleraciones máximas para el Cañon La Zurda, Jal.

FALLA	L LONGITUD (km)	D DESPLAZAMIENTO CALCULADO (m)	M MAGNITUD CALCULADA	R DISTANCIA (km)	g ACELERACION MÁXIMA
1	12	0.6	6.47	48	0.07
2	11	0.55	6.41	60	0.05
3	20	0.91	6.78	50	0.08
4	6	0.33	6.04	53	0.03
5	8	0.41	6.20	41	0.04
6	30	1.29	7.03	2	0.46
6'	8	0.41	6.20	2	0.41
7	11	0.55	6.41	24	0.10
8	24	1.01	6.88	39	0.09
9	50	2.01	7.35	15	0.27

D = Desplazamiento calculado (Bonilla, 1970)

$$\text{Log } D (0.3048) = 0.96 \text{ Log } L (1.60934) - 0.46$$

M = Magnitud calculada (King y Knopoff, 1968 p.253)

$$M = 1.4 + (\text{Log } LD^2)/1.9$$

en donde L y D están en centímetros

g = Aceleración máxima calculada (Campbell, 1981)

$$g = (0.0185 \exp(1.28M)) (R + 0.147 \exp 0.732M) \exp(-1.75)$$

en donde R es la distancia al sitio en kilómetros y con 1.47 de F.S.

A partir de la sismicidad histórica del catálogo del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Figura 2.6 y Tablas 2.2) se postula que el modelo puede recibir aceleración de tres fuentes (partiendo de la ecuación de Campbell, 1983, para sismos a más de 50 km de distancia):

- 1.- Alineación Graben Tepic-Chapala a 100 km del Cañón La Zurda, con sismicidad somera de eventos recientes con magnitud Richter hasta de 5.
- 2.- Zona del Eje Neovolcánico a 200 km de distancia, con sismos de hasta 6.
- 3.- Zona de subducción o trinchera de Acapulco en el Océano Pacífico a 300 km de distancia, con eventos de 7.8.

La aceleración máxima se calculó a partir de la ecuación:

$$g = (0.0159 \exp(0.868M)) ((R + 0.0606 \exp(0.7M)) \exp(-1.09))$$

en donde "R" es la distancia al cañón en kilómetros, "M" es la magnitud Richter promedio y "g" la aceleración máxima en por ciento y por 1.13 de factor de seguridad.

De los resultados de las Tablas 2.2 y 2.3 podemos concluir que de la sismicidad registrada, la sismicidad en la zona del proyecto es baja y que los eventos más cercanos son atribuibles a la Neotectónica del Eje Volcánico (Figura 2.7).

Se tiene una recurrencia promedio de 2.7 sismos por año en un área de más de 350 km hacia la Costa del Pacífico (Figura 3.6), por lo que se puede despreciar el evento cercano al proyecto y pensar que los impulsos sísmicos solamente llegarán con celeridades que apoyen un coeficiente promedio 0.12%g a partir de la evaluación de discontinuidades y de sismos registrados.

Tabla 2.2  
Sismos ocurridos de 1917 a 1982 en el área delimitada por los meridianos 102 a 107 grados (oeste) y los paralelos 19 a 22 grados (norte), registrados o recopilados por el Instituto de Ingeniería, U.N.A.M.

FECHA	HORA T M S	LATITUD N	LONGITUD W	PROF. KM	MAG. RICH.
200120	92503	19.063	102.563	100	4.00
200421	110341	19.700	104.283		7.75
010522	202011	21.250	101.500		3.00
240922	80754	21.250	101.500		3.00
111022	181120	19.100	101.083		3.00
121122	154207	19.100	101.083		3.00
070725	141408	20.367	106.383		6.00
070825	74827	19.100	101.083		5.00
161125	115649	20.367	106.383		7.00
190127	11741	19.363	102.883	100	6.00

Tabla 2.2 (continuación)

FEDHA	HORA T M S	LATITUD N	LONGITUD W	PROF. KM	NAG. RICH.
290228	135309	19,250	103,100		4.50
151028	20815	19,700	104,283		5.50
281130	73440	19,417	106,467		5.50
210231	225139	19,883	105,283		4.50
060331	91051	20,117	102,883		4.00
171231	171436	21,500	103,000		4.00
271231	54228	21,500	103,000		4.00
030632	103820	19,267	105,300		7.80
030632	162930	19,050	104,617		4.00
180632	220025	19,050	103,900		7.00
291032	33876	19,117	105,700	050	5.00
140333	93740	19,300	104,917		4.00
040633	132205	19,017	105,083		4.00
101033	133335	19,083	102,583		5.50
291133	54935	19,400	104,583		6.00
131233	212510	19,017	105,083		6.50
141233	71743	19,017	105,083		6.00
270534	184952	19,083	102,583		6.00
210534	64957	20,317	106,050		5.00
150634	65821	20,233	104,850		5.00
301134	20646	20,117	105,067		7.00
200335	105239	19,400	104,583		5.50
290635	65006	19,700	104,283		6.00
070536	100433	20,600	106,150		4.00
020137	223511	19,017	105,083		5.50
220237	11959	19,050	104,900		5.00
200937	70518	19,117	105,700		4.00
070438	85755	19,350	104,050		4.00
200538	193510	19,350	104,050		4.00
040139	125759	19,250	103,100		4.00
070740	53212	19,817	104,450		4.00
050741	70157	19,350	104,067		4.00
180644	231730	19,117	105,700		4.00
180644	215304	19,117	105,700		4.50
230645	172033	20,600	106,150		6.00
140846	161501	20,967	101,050		4.00
100947	22215	20,317	106,050		5.00
021048	160903	19,267	105,300		5.80
041248	2247	21,633	106,667		7.50
041248	24328	21,633	106,667		6.50
041248	35249	21,633	106,667		6.00
041248	75217	21,633	106,667		6.00
041248	155723	21,633	106,667		6.00
030249	13436	19,050	103,900		4.00
140249	189727	19,100	106,000		5.80
251249	222707	19,017	105,083		4.00
251249	224027	19,017	105,083		6.00
110950	5319	18,483	103,867		5.00
241150	31256	19,017	105,083		5.50
150251	52024	19,017	105,783		5.70
060551	165546	19,550	105,483		5.50

Tabla 2.2 (continuación)

FEDHA	HOFA T M G	LATITUD N	LONGITUD M	PROF. M	MAG. RICH.
050452	21528	19.650	102.183		4.00
11452	143242	19.650	102.183		4.20
180752	230205	19.083	102.583	100	5.00
290752	22931	19.017	105.083		4.00
170553	164057	19.017	105.083		5.50
170254	34239	19.017	105.083		5.25
170155	212748	20.660	106.150		5.20
250555	15111	19.083	105.283		4.50
290655	75057	19.083	102.583	100	4.00
050855	31210	19.100	106.000		5.50
161755	53043	19.400	104.530		5.00
231256	22053	19.050	103.900		4.00
131257	40551	19.650	102.183		4.60
131257	61911	19.650	102.183		4.20
251257	84707	19.083	102.583	100	4.90
231158	51312	21.467	101.667		4.50
050259	35352	18.617	105.233		4.00
220459	2216	19.083	102.583		4.00
170460	72559	19.017	105.083		4.70
040660	22653	19.550	105.483		6.40
160760	164824	19.267	105.300		4.20
230761	523	19.267	105.300		5.10
270961	15531	19.017	105.083		4.90
160962	30543	19.383	102.683	100	5.74
010164	94404	19.117	105.700		4.00
080364	191252	20.917	105.567		4.40
080364	194444	20.917	105.567		4.55
041164	54623	19.400	104.583		4.20
151264	34010	21.633	106.667		5.10
020165	192354	19.017	105.083		4.00
310365	5712	19.450	105.900		4.10
240965	171344	20.600	106.150		5.66
250965	200602	20.600	106.150	033	4.10
260965	192827	20.400	105.600	033	4.00
300965	13050	20.600	106.150		4.00
300965	41028	20.600	106.150		4.30
110256	223831	19.083	102.583	100	4.10
120556	113956	20.787	103.183		4.00
080856	231047	19.050	103.900		5.10
100856	125653	19.350	104.067		4.10
310856	24413	19.050	103.900		4.16
211166	111203	19.083	102.583	100	5.00
041167	115858	19.217	102.667		4.10
080268	152128	19.117	103.417	100	4.10
300368	60433	19.183	103.500		4.40
230468	90810	19.183	105.333		4.10
300668	202127	18.200	105.333		5.00
050668	183406	18.200	106.000		4.60
300469	150435	19.100	104.350	036	4.60
080569	74830	19.400	104.400		4.00
041169	24549	19.300	104.900		4.10

Tabla 2.2 (continuación)

FECHA	HORA T M G	LATITUD	LONGITUD	PROF. M	MAS. RICH.
		N	W		
240670	1959215	19.500	104.500	33	
250670	0523540	19.400	104.370	33	
100770	2015255	19.100	102.600	100	3.80
070970	1918299	19.672	104.816	33	4.80
051270	2334422	19.162	106.454	33	4.30
210371	0115150	19.200	103.760	33	4.70
120871	1429510	19.800	105.700	33	5.80
126871	1017370	19.700	106.000	33	4.50
119272	1450205	19.300	102.370	150	4.60
040373	1095281	19.190	102.480	33	4.60
130673	0849048	19.890	106.540	33	5.10
290773	1616289	19.770	103.490	130	
181973	1049370	19.420	105.060	45	6.50
191073	0349490	19.500	105.320	33	5.00
230774	1528748	19.810	104.100	109	4.90
250575	0559162	19.680	104.900	90	4.80
130476	2017500	19.060	105.500	33	5.00
170476	0057270	19.000	102.615	33	4.00
250576	0722566	19.060	104.767	33	4.70
170776	0501590	19.116	105.700	33	5.40
170776	0928100	19.116	105.700	33	5.00
170776	1224110	19.116	105.700	33	3.00
170776	1241240	19.116	105.700	33	3.00
210776	1022550	19.632	104.058	33	5.00
010976	2257040	19.380	103.190	33	3.00
211076	0459660	19.333	105.150	33	6.00
110177	1809500	19.643	103.770	37	3.00
120177	2325420	19.446	104.604	33	3.00
120377	0809150	19.000	106.380	33	6.00
160777	0640130	19.250	102.340	33	3.00
240777	0110220	19.180	103.060	33	4.00
270278	0117180	19.110	105.620	33	5.70
270678	1618380	19.000	105.280	33	5.00
090478	0415110	19.340	103.000	33	4.00
280978	0416460	19.320	102.810	50	4.00
171278	1539370	19.700	105.740	33	4.50
170579	1317394	19.494	106.571	118	4.20
170779	0754145	19.000	103.080	33	
260879	2359430	19.520	102.170	33	4.00
270879	0454130	19.700	102.320	33	
130979	1129010	19.590	103.320	33	4.00
130680	0935130	19.150	102.770	33	
030980	0324250	19.280	104.450	33	3.00
220581	1430098	19.756	105.066	93	4.70
020781	1515580	19.107	103.339	38	3.50
051281	0112320	19.230	104.760	33	4.90
090382	2131595	19.323	105.565	30	4.00
270482	0852116	19.296	103.242	33	3.50
251082	1456307	19.036	105.067	33	4.80

FECHA	HORA T M G	Tabla 2.2 (continuación)		PROF. M	MAG. RICH.
		LATITUD N	LONGITUD M		
210671	0109214	20.550	106.100	33	4.00
040672	1000207	20.200	106.100	33	3.80
251072	1632532	20.600	105.900	33	4.30
140474	1831250	20.190	109.970	33	
311076	1220130	20.851	103.156	33	3.00
071176	1529460	20.900	106.070	33	5.00
111176	1405060	20.240	104.270	33	4.50
121079	1045180	20.560	102.560	33	
090180	2145356	20.200	106.170	33	4.00
070281	0526570	20.240	105.660	33	5.30
220773	0343004	21.500	106.600	33	4.50
260976	0357210	21.360	104.190	33	3.00
110778	0538540	21.000	105.840	33	4.00
270379	0253520	21.450	102.150	33	4.50

Tabla 2.3 Evaluación de Aceleraciones por Neotectónica para el Cerón La Lurda, Jal.

M	R	Z g	1.13g
5	100	0.008	0.009
6	200	0.008	0.009
7.8	300	0.03	0.034

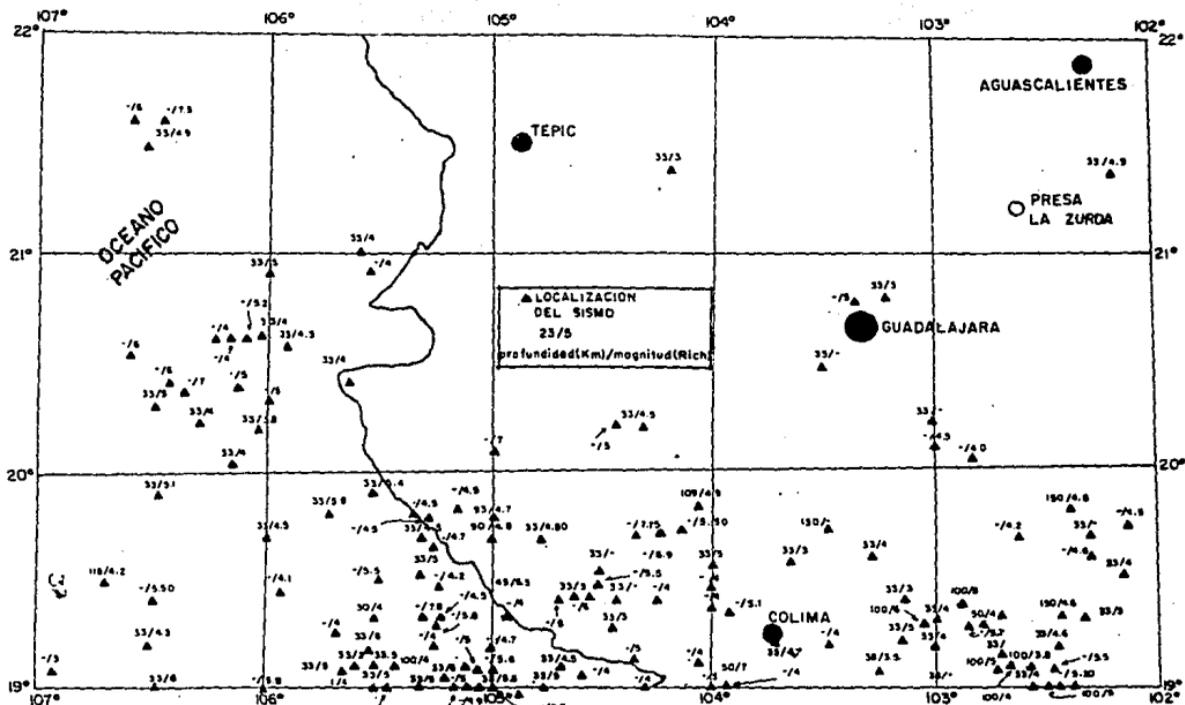


FIGURA 2.6 LOCALIZACION DE SISMOS OCURRIDOS DE 1917 a 1982 EN UN AREA DELIMITADA POR LOS MERIDIANOS 102° a 107° (W) Y LOS PARALELOS 19° a 22° (N).

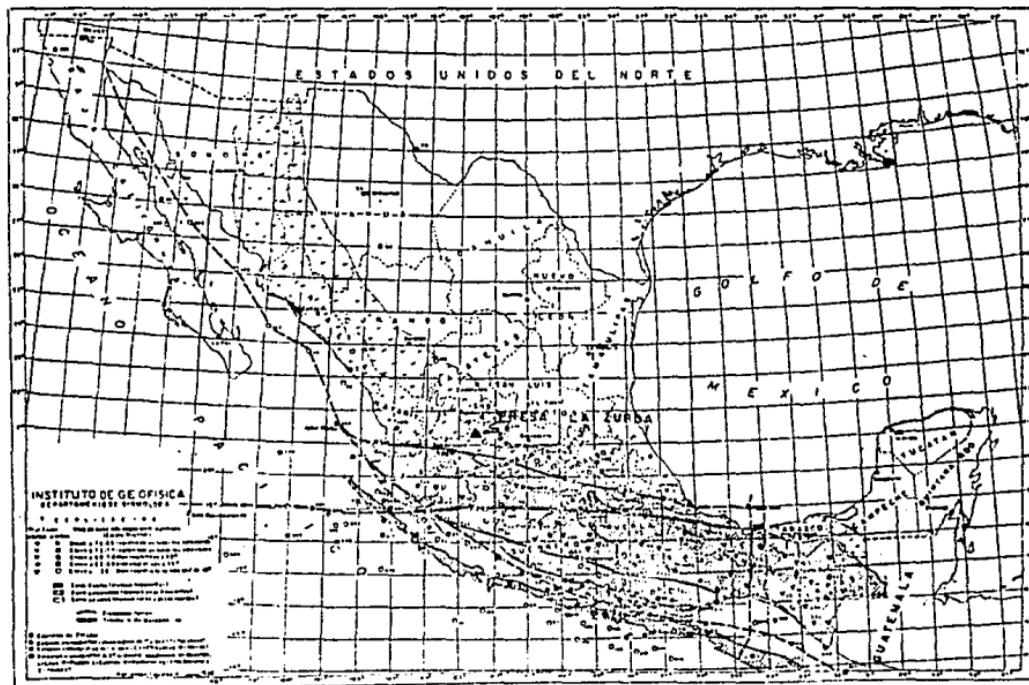


FIGURA 2.7

### 3 GEOLOGIA DEL EMBALSE

Para un mejor tratamiento de esta parte se dividió la Geología del Embalse en Estratigrafía, Estructuras, Geohidrología, Geotermia y Bancos de Material; que son las características principales que van a determinar el comportamiento del embalse, así como los materiales posibles de construcción de la cortina y que se describen a continuación:

#### 3.1 ESTRATIGRAFIA

Las rocas que afloran en el área del vaso son principalmente de origen lacustre híbrido con abundante material volcánico (ceniza y lapilli), en segundo término se encuentran derrames lávicos de andesitas y basaltos, finalmente, en menor proporción, se tienen reducidos afloramientos de rocas ignimbríticas ácidas, así como materiales de acarreos y terrazas aluviales. En total se definieron ocho unidades que a continuación se describen brevemente en orden de más antigua a más joven.

##### Unidad de Ignimbritas Vítreas (Igea).-

Esta unidad es el basamento de la secuencia se constituye de: tobas de caída libre, Ignimbritas líticas riolíticas, con textura fluidal e Ignimbritas Riocásticas.

Regionalmente se distribuye en los alrededores del área de estudio, pero dentro de ésta sólo aflora en su porción sur. Su espesor total se desconoce, pero se presume tenga un mínimo de 500 m. Su edad, por dataciones radiométricas en áreas aledañas es de 23 m.a. (Nieto, 1980) por lo que se coloca en el Oligoceno-Mioceno; se formaron por el mismo proceso de calderas que dio origen a la Sierra Madre Occidental. En general se presentan compactas y duras, carecen de permeabilidad primaria, pero al mostrarse fracturadas desarrollan permeabilidad secundaria.

##### Unidad Masiva (UIII).-

Descansando sobre el basamento se encuentra la Unidad III, que con este nombre se define a una arenisca pumítica de grano fino y origen híbrido (sedimentario-piroclástico), formada por vidrio y pomez de composición dacítica y en menor proporción, fragmentos clásticos redondeados de riolitas, ignimbritas y basaltos; presenta alta compactidad, pero carece de cementante.

Lateralmente gradúa a conglomerados de riolitas y andesitas de matriz areno-arcillosa de forma lenticular. En general se presenta en la porción media y sur del vaso, desde Temacapulín hasta Apánico. Se ignora su espesor, pero como mínimo cuenta con 100 m. Descansa discordantemente sobre la Unidad de Ignimbritas vitreas y la cubren concordantemente sedimentos lacustres o coladas lávicas. En general se muestra masiva con escaso fracturamiento, muy compacta y sin cementante.

#### **Unidad Estratificada (UII).-**

Se constituye por una interestratificación de: materiales limo-arenosos y limo-arcillosos de color verdoso, poco compactos, así como por horizontes de caliza y pedernal verdoso o de color blancusco, muy duros; y de areniscas, tanto fluviales de grano grueso como híbridas dacíticas de grano medio, ambas de color gris o pardusco. Tiene una distribución similar a la de la Unidad III, poco más reducida. Su espesor varía de 40 a 80 m.

Descansa sobre la Unidad III y la cubre discordantemente la Unidad I. Su origen es tanto lacustre como fluvial. Geotécnicamente presenta materiales blandos, poco compactos y deleznales (arcillas) y materiales duros, compactos y poco fracturados (calizas y pedernales) se considera prácticamente impermeable.

#### **Unidad Basáltica-Andesítica (UI)**

Se forma por coladas de andesitas y basaltos de color gris oscuro y en ocasiones rojizo; se componen por plagioclasas, piroxenos y olivino. Tiene una distribución errática con afloramientos aislados que se concentran hacia la porción media y sur del área; las coladas individuales en general tienen un espesor de unos 25 m, pero superpuestas alcanzan hasta los 80 m, normalmente cubren áreas de 3 a 10 kilómetros cuadrados. Su origen se relaciona tanto a conos cineríticos como a fisuras.

En base a dataciones en zonas aledañas, donde arrojaron edades del orden de 10-11 m.a., se les asignó una edad Mioceno Medio-Superior (Nieto, 1980). Esta unidad descansa discordantemente sobre las Unidades II o III y subyace a la Unidad Superior Vulcanoclástica (Us).

#### **Unidad Superior Vulcanoclástica (Us)**

La Unidad Superior (Us) esta formada por una interestratificación de materiales limo-arcilloso y limo-arenoso de color amarillento, poco compacto, deleznable y con alto contenido de carbonatos; material volcánico (lapilli y ceniza) de color blanco y grisáceo, poco compacto y deleznable, con algo de carbonatos; y en menor proporción, horizontes de calizas y pedernales de color crema y verde, compactos, duros y poco fracturados.

En general aflora en toda el área cartografiada en la porción sur solo aparece en las partes altas, mientras que hacia el norte aflora desde la base de los arroyos. Su espesor total no se midió, pero es mayor a 50 m. Su origen es lacustre híbrido con un fuerte aporte de material piroclástico. Esta unidad se depositó sobre la Unidad I ó sobre las Unidades II ó III; por sus relaciones estratigráficas se la considera del Plioceno o Plior-Pleistoceno.

La unidad en general se muestra compacta, pero deleznable, por su contenido de materiales finos se considera impermeable.

#### Unidad Arenosa (Ua)

Se constituye por material limo-arenoso de color verde a pardusco, poco compacto y ocasionalmente con carbonatos, así como por areniscas verdes cementadas por sílice o calcita, bien compacta y dura y por ocasionales calizas y pedernales de color crema o verde. Esta unidad aflora en casi toda el área cartografiada cobetando en las partes altas; su espesor está del orden de 10-12 m llegando a alcanzar hasta 20 m. Su origen es típico fluvial que gradúa a lacustre. La unidad sobryace a la Unidad Superior Vulcanoclástica y es la cima de la secuencia, por sobreposición se le asigna una edad Pleistoceno. Su comportamiento es variable, mostrándose muy compacta y deleznable, en general se considera permeable.

#### Terrazas Aluviales (Qte)

Están formadas esencialmente por arenas finas, y en menor proporción limos, arcillas y gravas. Normalmente se encuentran poco compactas a sueltas. Se localizan en las inmediaciones de las corrientes más importantes, su espesor promedio es de 3 a 4 m, pero alcanzan hasta 12 m. Estas terrazas se formaron sobre antiguas planicies de inundación.

Los materiales se encuentran poco consolidados y con alta permeabilidad.

#### Acarreos (Qac)

Se constituyen por cantos de rocas igneas extrusivas, bien redondeados, con tamaños de hasta unos 20 ó 30 cm; en menor proporción contiene arenas finas y gruesas; se ubican sobre el cauce de las corrientes principales, y en algunos casos, sobre terrazas aluviales. Son materiales recientes, con espesores mínimos de unos 7 m, se encuentran poco consolidados y presentan alta permeabilidad.

### 3.2 ESTRUCTURAS.

Debido a que la mayor parte del área del vaso está cubierta por sedimentos lacustres formados por materiales blandos, poco consolidados y de comportamiento plástico, no se han desarrollado una gran cantidad de estructuras mayores como fallas y fracturas; ésto, aunado al hecho de que los sedimentos son relativamente jóvenes (Mioceno Tardío, Plio-Fleistoceno), no habiendo sufrido la influencia de algún evento tectónico posterior a su depósito, implica que la mayoría de las fracturas y dislocamientos presentes son producto de ajustes por gravedad. Sin embargo, las rocas duras y compactas intercaladas con los sedimentos blandos presentan un comportamiento dúctil, ante los procesos tensionales sufridos, por lo que han desarrollado fracturas y fallas de poca continuidad afectando sólo a las rocas compactas.

La información estructural recabada y procesada se agrupó en estratificación, fracturas y fallas.

#### - Estratificación

Se presenta muy bien definida en las unidades sedimentarias aflorantes en el vaso (UII, Us, Ua); su posición es sensiblemente horizontal, con echados que varían de 0 a 10 grados, sin apreciarse una tendencia bien definida. Este comportamiento se explica por el hecho de que las capas se encuentran en su posición original de depósito, las inclinaciones se interpretan como reacomodos a causa del propio peso de los sedimentos.

#### - Fracturamiento

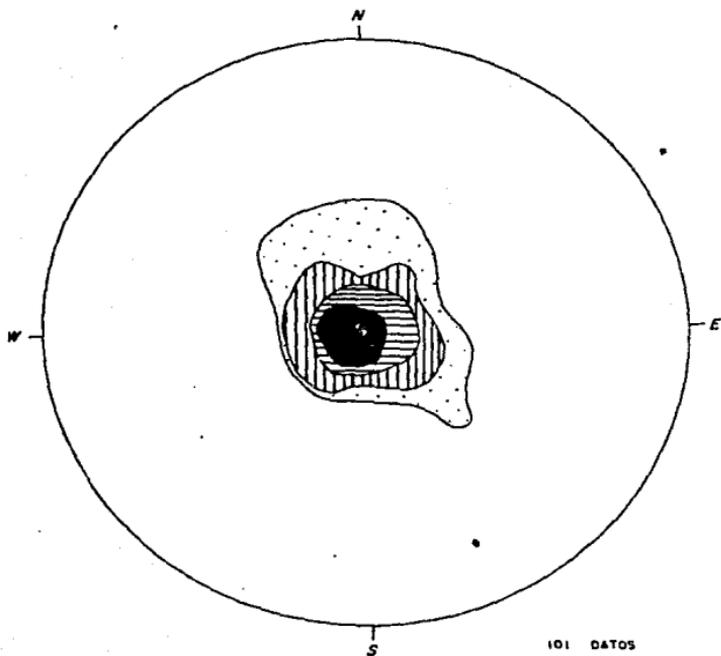
El estudio de las fracturas se realizó en base a alineamientos interpretados en las fotografías aéreas, construyendo una roseta de fracturamiento (Figura 3.2).

Se identificaron cuatro sistemas preferenciales con una gran dispersión: ALFA, con orientación NE 45 grados, representa al 7% de las estructuras; BETA, con orientación NE 65 grados, representa el 9%; DELTA, con orientación SE 60 grados, representa el 7%; y EPSILON con orientación NE 25 grados, representa la mayor frecuencia con 10%. Los sistemas de fracturamiento tienen relación con los sistemas identificados en el estudio tectónico regional que corresponden con estructuras mayores, como fallas normales regionales, de orientación preferencial NE-SW.

#### - Fallas

El fallamiento existente en el área cartografiada es incipiente, identificándose tan solo fallas con saltos que varían de algunas decenas de centímetros a cerca de un par de metros.

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE CONCENTRACION DE PLANOS DE  
ESTRATIFICACION EN EL VASO (UNIDAD U<sub>W</sub>, U<sub>E</sub>, U<sub>s</sub>, U<sub>o</sub>).



101 DATOS

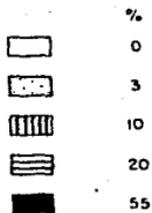


FIGURA 3.1

# ROSETA DE FRACTURAMIENTO DEL VASO

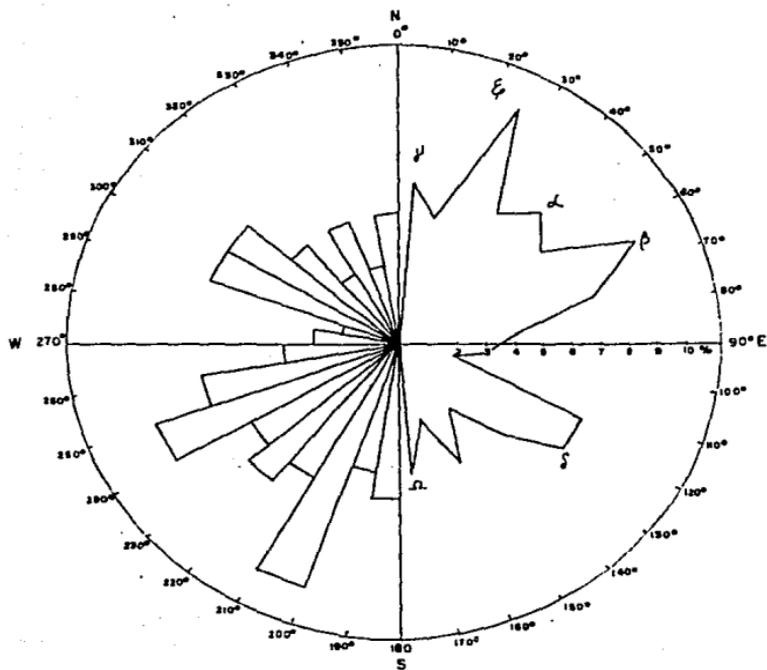


Figura 3.2

Sistema	Porcentaje	Estructuras	Orientación
ε	10 %	10	NE 25°
β	9 %	9	NE 65°
δ	7 %	7 (14)	SE 120°
α	7 %	7	NE 45°

UNIVERSO 122  
ESTRUCTURAS

### 3.3 GEOHIDROLOGIA.

En base al modelo de depósito de las unidades litológicas y sus características hidrogeológicas, se considera que existen buenas condiciones de impermeabilidad que aseguran un cierre satisfactorio, sin posibilidad de fugas importantes, tanto laterales como a profundidad.

El problema de fugas por flanco podría presentarse localmente en algunos sitios, como en la margen derecha del Eje E, en donde por lo meándrico del río se reduce la distancia entre el embalse y un escurrimiento aguas abajo del eje.

La Unidad III se considera como un material permeable, ya que existe un nivel freático a la altura del Río Verde y las pruebas de permeabilidad indican que en sus primeros metros es un material permeable a poco permeable; sin embargo, a profundidad se vuelve en términos generales impermeable, además de que su permeabilidad horizontal debe ser mayor que la vertical por lo que el agua fluirá hacia aguas abajo.

La Unidad II por su alto contenido de arcillas se considera de poco permeable a impermeable.

La Unidad Superior es la de mayor superficie de afloramiento en el vaso; y sus materiales volcánicos (pómez y cenizas) pueden considerarse permeables, pero por encontrarse intercalados entre calizas, pedernales, limos y arcillas se considera que el paquete se encuentra sellado e impermeable. Las andesitas y basaltos, en la zona de Apánico, se muestran con permeabilidad secundaria por fracturamiento, sin embargo por el hecho de encontrarse descansando sobre la Unidad II se considera que no habrá fugas por la Unidad I.

### 3.4 GEOTECNIA.

#### - Estabilidad de las Laderas

Dadas las condiciones de las rocas aflorantes en la zona de embalse, se consideró que las discontinuidades que pueden influir en la posible inestabilidad de laderas son los planos de estratificación y el fracturamiento. Sin embargo, por encontrarse los planos de estratificación en una posición sensiblemente horizontal es difícil que se puedan producir deslizamientos sobre este tipo de discontinuidades. Por otro lado, el fracturamiento tampoco representa un riesgo para la estabilidad, ya que no fueron detectadas grandes fracturas que afecten al macizo rocoso, así como tampoco sistemas bien definidos: en efecto, la mayor cantidad de fracturas observadas que se presenta a las rocas estratificadas compactas son de muy baja continuidad por lo que su influencia en estabilidad es reducida.

Las zonas consideradas potencialmente inestables se consideraron básicamente los escarpes de fuerte pendiente, los cuales en condiciones saturadas por el embalse podrían volverse inestables. Sin embargo, la mayoría de ellas son superficies pequeñas y alejadas de la zona de la cortina, por lo que el problema se minimiza.

#### - Azolves

Se concluye que uno de los problemas geotécnicos que se presentará en el embalse es el azolve, ya que por la constitución blanda, sin consolidar y deleznable de los materiales que conforman a las unidades Us, UII y UIII, se facilita su erosión en tiempos relativamente cortos.

### **3.5 BANCOS DE MATERIAL.**

Los bancos de materiales se trataron como materiales para enrocamiento, filtros y agregados para concreto, así como finos (arcillas) y se consideraron tanto para el Cañón La Zurda como para Apanico.

#### **- Material de Enrocamiento**

El material de enrocamiento puede obtenerse de las andesitas de la Unidad I o de las ignimbritas. La roca andesítica es de buena calidad, se encuentra compacta, dura y prácticamente sana, su densidad promedio es de 2.4 g/cm<sup>3</sup>, siendo su resistencia a la compresión simple de 838 kg/cm<sup>2</sup>.

Se considera que se pueden obtener las cantidades necesarias de bloques entre 1.3 y 5.2 ton, con dimensiones de 0.60 a 1.20 m de lado y 1.5 m de alto; el sitio recomendable se encuentra en el Cañón a unos 500 ó 600 m aguas arriba del Eje 1, sobre la margen izquierda.

En cuanto a las ignimbritas, estas se presentan con diversas características, sin embargo es posible obtener en cantidades necesarias, rocas resistentes, bien soldadas, sanas y duras; el sitio adecuado se ubica a un lado de la unión del arroyo que desemboca al Río Verde, aguas abajo del Eje 1, donde pueden obtenerse bloques de tamaño necesario y a una distancia de 2 km del Eje 1.

#### **- Material para Filtros y Agregados de Concreto**

Para el Cañón de La Zurda, las gravas y arenas se encuentran en calidad y cantidad suficiente en la porción inferior de algunas zonas de las terrazas aluviales, así como a lo largo del cauce en la zona de acarreos.

Un sitio favorable es un banco actualmente en explotación a 2.5 km aguas abajo del Eje 1, donde pueden obtenerse desde arenas finas hasta gravas y boleos de unos 20 cm, el lugar resulta particularmente atractivo para los Ejes 1, 2 y 3. Otro sitio con buenas posibilidades de explotación de gravas y arenas es una terraza aluvial ubicada a un kilómetro aguas arriba del Eje 5, que podría proporcionar material para las opciones de Ejes 4 ó 5, en caso de que se eligieran estos sitios.

#### - Materiales Finos (Arcillas)

Se consideró un lugar con posibilidades de explotación, se trata de un estrato de arcillas blancas de un metro aproximadamente de espesor, dentro de la Unidad Superior. El sitio se ubica sobre el camino que une Temacapulín con Mexitlicacán y se encuentra a unos 6 km de la porción media del cañon. No se recomienda el uso de las arcillas de la Unidad II por encontrarse en espesores pequeños e intercalado con rocas compactas. Además tienen un cierto porcentaje de minerales potencialmente expansivos. Asimismo, tampoco se pueden utilizar los depósitos de las terrazas aluviales por estar formadas predominantemente por arenas finas y limos.

En el caso del sitio Apánico la posibilidad de explotar arcillas en algún lugar cercano es muy reducida, de hecho la mejor opción es la utilización de los materiales limo-arcillosos de la Unidad Superior ubicados en el área de San Nicolás, que dista unos 10 km por caminos de terracería.

Uno de los principales objetivos de este estudio fue el conocer con detalle la geología de la zona del Cañon de La Zurda, ubicada entre los ejes 1 y 5; en donde se requería determinar la distribución en planta de las diferentes unidades litológicas, sus características petrológicas, estratigráficas y geotécnicas; así como la presencia y características de los rasgos estructurales que afectan a los macizos rocosos. Para realizar estos objetivos se llevaron a cabo las siguientes actividades de trabajo:

En primer término, se llevo a cabo una fotointerpretación geológica de la zona del Cañon, auxiliando con fotografías aéreas verticales escala 1:10,000, las cuales fueron proporcionadas por la S.A.R.H.; en ellas se delimitaron los contactos de unidades litológicas y las principales estructuras geológicas; posteriormente, se verificaron en campo los contactos geológicos, efectuando las correcciones pertinentes. Durante esta etapa, se realizó una medición y muestreo de once columnas estratigráficas, levantadas a un detalle de centímetros; las cuales fueron distribuidas de tal forma que fueran representativas del Cañon, y desde luego, donde hubiese mayor número de afloramientos. Durante la medición se muestrearon las unidades para realizar los estudios petrográficos y de propiedades mecánicas de tal forma que se tuviera un control estricto de sus variaciones tanto verticales como horizontales.

Posteriormente, en gabinete, se reinterpretaron las fotografías aéreas y se vació esta información en los planos topográficos, escala 1:5,000, (elaborados por restitución fotogramétrica de las fotografías aéreas 1:10,000) proporcionado por la S.A.R.H., formando así el plano geológico del Cañon (Plano 4.1').

A las muestras colectadas se les hicieron las siguientes pruebas físicas y mecánicas:

Densidad, resistencia a la carga puntual, resistencia a la compresión simple uniaxial y determinación de módulos de deformación estáticos. Asimismo se midieron las velocidades sonicas longitudinales y transversales, con lo que se obtuvieron los parámetros de módulo de Young (E din), módulo de corte (G), relación de Poisson e índice de fracturamiento (Iq); estos resultados se analizan en el capítulo 5.

A las muestras también se les hicieron láminas delgadas para realizar estudios petrográficos, y definir más formalmente las unidades rocosas.

Es importante señalar, que los estudios antes mencionados solo se efectuaron a los materiales que su consistencia lo permitía, ya que los materiales finos y poco compactos se les practicaron análisis químicos (fluorescencia de Rayos X) y difracción de Rayos X, con el fin de determinar si la arcilla era de tipo bentonítico y en qué proporción se encuentra.

Una vez procesada e interpretada toda la información de campo y gabinete fue posible elaborar planos y secciones geológicas; así como plantear el modelo geológico-geotécnico del Cañon de La Zurda.

El Cañón de La Zurda tiene una longitud aproximada de cinco kilómetros, un ancho que varía de 150 a 250 m y alcanza profundidades de 100 m aproximadamente, en él afloran cuatro unidades litológicas, con características geológico-geotécnicas diferentes, las cuales se han denominado: Unidad Masiva (UIII), la Unidad Estratificada (UII), la Unidad Basáltico-Andesítica (UI) y la Unidad Superior Vulcanoclastica (Us). La nomenclatura de estas unidades es la misma que la del vaso y la de los estudios anteriores.

La base de la secuencia es la Unidad Masiva, que se encuentra descansando sobre las rocas ignimbríticas (Igea), aunque este contacto no se observa en el Cañón; la Unidad II descansa concordantemente sobre la Unidad III y subyace por discordancia erosional a la Unidad I; que a su vez, subyace a la Unidad Superior Vulcanoclastica, la cual es la cima de la secuencia.

Estas Unidades afloran hacia aguas arriba hasta la altura de las localidades de Ostatán, Teocaltitán y Apanico; mientras que hacia aguas abajo aparecen hasta cerca de un lugar denominado El Zapotillo.

A continuación se describen brevemente las características geológicas que permitieron diferenciar las Unidades:

**La Unidad Masiva**, como su nombre lo indica, carece de planos de estratificación y de fracturamiento importante; debido a que no tiene cementante se comporta como un material delornable; no se observo ningún cambio de compacidad o cementación notable a lo largo de todo el Cañon.

**La Unidad II**, se distinguió por la notable estratificación y la presencia de diversos materiales intercalados; por lo que se subdividió en cuatro unidades, que se les identificaron características geológico-geotécnicas diferentes.

La Unidad denominada I, está formada por una roca andesítica compacta que presenta un moderado fracturamiento y aflora en la porción central del Cañon.

Por último. La Unidad Superior Vulcanoclástica, se encuentra siempre por arriba de la zona donde se va a construir la cortina, y en general se puede considerar como una unidad poco compacta, deleznable y con escaso fracturamiento.

En este capítulo se describirá, en primer término, la estratigrafía y posteriormente los rasgos estructurales principales que afectan a los materiales y al macizo rocoso.

#### 4.1 ESTRATIGRAFIA

Las unidades se irán describiendo en secuencia cronológica, empezando por la más antigua y con el siguiente orden: litología, distribución, espesor, origen y características geotécnicas.

##### 4.1.1 Unidad Masiva (UIII).

La Unidad Masiva está representada por una arenisca pumítica de composición dacítica-riolítica.

Es la unidad más antigua que aflora, en el Cañon, formada por un grueso paquete de ceniza dacítica-riolítica de color café claro, sin cementante y con abundantes fragmentos de pómez del tamaño de arenas y gravas.

La unidad está compacta, y en su mayor parte, masiva; aún en sus mejores afloramientos la cantidad de estructuras primarias que se les pueden observar son extraordinariamente escasas. La estratificación es masiva, pobremente definida y en intervalos promedio de 4 metros. En estos casos, con frecuencia lo que delata es la presencia de los planos, es una concentración de cantos de pómez blanco, los cuales probablemente flotaron en el agua durante algunos días y posteriormente, ya saturados de agua, se hundieron. Entre los fragmentos típicos en esta unidad está la obsidiana, el cuarzo y el sanidino.

La parte superior de la unidad varía localmente. En algunos lugares aumenta la cantidad de arenas, que pueden llegar a tener coloraciones verdosas. En otros, las arenas van acompañadas por estructuras de corte y relleno, conglomerados en las bases de los estratos y estratificación cruzada.

Se denomina pumítica porque esta compuesta esencialmente por pómez y vidrio; como componentes menores se presentaron plagioclasas, piroxenos, magnetita, hematita y líticos.

Se encuentra distribuida en todo el Cañón sin tener cambios notables en su composición, granulometría, compacidad, ni grado de fracturamiento.

El espesor que se midió en las columnas es de 60 m, sin que aflore la base; tomando en cuenta la perforación que se hizo en el eje 5, se infiere que la unidad masiva debe tener por lo menos 100 metros de espesor.

Esta unidad es eminentemente volcánica, en cuanto a composición se refiere, pero para alcanzar espesores como los que se tienen, es necesario pensar que tuvo que haber un proceso de removilización y acumulación de este material en un ambiente fluvial.

En la zona del Cañón no aflora la base, pero en el camino Temacapulín - Cañadas de Obregón, se observó que descansa sobre la Unidad Ignimbrítica (Igea) y subyace concordantemente a la Unidad Estratificada (UII).

En cuanto a sus aspectos geotécnicos, la unidad está formada por una arenisca de grano fino con matriz limosa (Figura 4.1A), sin cementarse; sin embargo, se encuentra compacta, ya que las partículas están bien unidas entre ellas y para disgregarlas se requiere presionarla con fuerza de los dedos, ya que la roca es blanda. La estructura masiva y el espaciamiento amplio de las fracturas favorecerán el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Superficialmente presenta un ligero intemperismo con costras oscuras más duras que la roca, en algunas zonas se observó un moderado intemperismo al encontrarse el material parcialmente desintegrado.

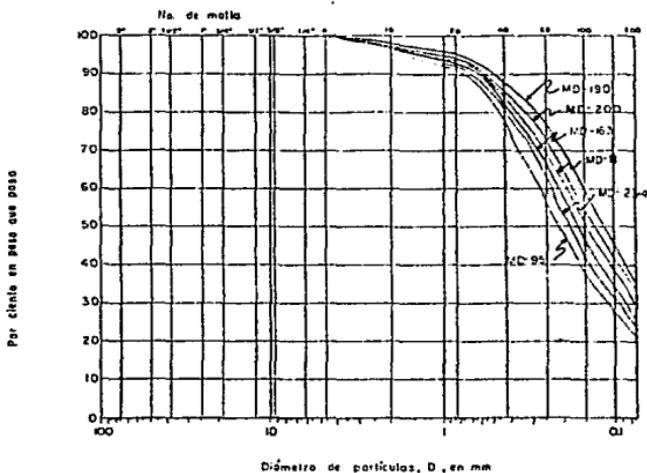
#### **4.1.2 Unidad Estratificada (UII)**

La Unidad Estratificada fue necesario dividirla en cuatro subunidades de acuerdo con la litología predominante, ya que para los objetivos del estudio tiene una importancia fundamental la presencia y cantidad de arcillas en cada unidad. A las subunidades se denominaron UIIa, UIIb, UIIc y UIId, y se encuentran en la mayoría de las columnas que se midieron en el Cañón, o bien se presentan con algunas variaciones en cuanto a composición y espesor.

##### **4.1.2.1 Paquete Lacustre Inferior (UIIa)**

Esta unidad se integra por horizontes y lentes de caliza y pedernal, de color verde, blanco y crema en estratos delgados con espesores que van desde 10 a 50 cm; interestratificados con arcillas y limos de color verdoso, en horizontes con espesor promedio de 50 cm, siendo el paquete con mayor porcentaje de arcilla de la zona del cañón.

S U C S	G R A V A		A R E N A		
	GRUESA	FINA	GRUESA	MEDIA	FINA



Descripción	Arena Limosa color café claro	
	MD-190	MD-95
Límite líquido LL (%)	36.4	36.9
Índice plástico LP (%)	11.3	10.4

Figura 4. 1A Curvas de distribución granulométrica.  
muestras de la presa La Zurda

El espesor de esta unidad en el Cañon varia de 15 m en la sección 1 margen izquierda, a solo escasos 8 m en la margen derecha. En la columna 2, margen izquierda, presenta 8 m de espesor, y mientras que la margen derecha mide aproximadamente 18 m.

En la columna 3 mide 10 m, en ambas márgenes. La columna 4, margen izquierda, alcanza un espesor aproximado de 18 m, mientras que en la margen derecha no se presentó; lo mismo sucedió en toda la sección 5.

A este paquete se le asocia un ambiente de formación de tipo lacustre donde debió existir un tirante de agua somero.

Se encuentra descansando directamente sobre la Unidad Masiva (UIII) y subyace a la subunidad (UIb) en los lugares donde existe esta.

Geotécnicamente, los limos y arcillas se encuentran formados por minerales montmoriloníticos que implican el riesgo de la expansión anormal al contacto con el agua y de la pérdida de cohesión, se presentan poco compactos, de consistencia moderada y en algunos sitios deleznable y muy intemperizados.

Los pedernales y calizas se presentan duros y compactos, en espesores entre 30 y 60 cm y con fracturas pequeñas de poca continuidad que no atraviesan los materiales blandos. El intemperismo de las rocas es ligero.

La posición estructural de la secuencia es sensiblemente horizontal, lo que favorece la estabilidad del macizo rocoso.

#### **4.1.2.2 Paquete Fluvial (UIIb)**

Se constituye principalmente por areniscas y areniscas conglomeráticas o limosas, bien compactas y cementadas, intercaladas con algunos horizontes y lentes de limos arenosos, pedernal y calizas. El paquete no está bien estratificado ya que forma lentes tanto en las rocas como en los horizontes arcillosos; las estructuras primarias que la caracterizan son las ridaduras, estratificación cruzada y graduada, así como estructuras de corte y relleno, típicas de paleocanales.

En la columna 1 tiene un espesor promedio de 20 m en ambas márgenes; mientras que en la columna 2, margen izquierda alcanza cerca de 30 m, y en la margen derecha tiene solo 18 m; en la columna 3, no fue posible diferenciarla debido a que está cubierto por talud; en la columna 4, margen izquierda, se le midió un espesor de 24 m, mientras que en la margen derecha alcanza un espesor de 80 m. En la sección 5 margen izquierda, llega a tener un espesor de 50 m., y en la margen derecha, considerando la información que se obtuvo de los barrenos perforados por la S.A.R.H., se cortó 35 m de esta subunidad.

En esta zona la arenisca se presentó la textura conglomerática en base a las estructuras encontradas (irregular, estratificación cruzada y estratificación graduada) se interpreta que el ambiente de formación de este paquete es fluvial con sistemas trenzados, en corrientes efímeras y rápidas; no existe una buena clasificación, indicando que las corrientes perdían competencia rápidamente y que los clastos se movían en suspensión.

Descansa directamente y en contacto transicional con la subunidad (UIIa) y le subyace a la subunidad (UIIc) en la misma forma.

Las areniscas presentan buenas características geotécnicas al estar bien compactas y duras; algunas de ellas bien cementadas y con intemperismo moderado a ligero; el pedernal y caliza se encuentran en espesores más pequeños, compactos y duros, con ligero intemperismo. Los limos arenosos se presentan en menor proporción y son blandos y poco compactos.

#### 4.1.2.3 Paquete Lacustre Superior (UIIc)

La Unidad Lacustre Superior está integrada por horizontes y lentes de calizas y pedernales, color crema a verdoso, compactos; interestratificados con limos y arcillas color verdoso, poco compactos y delcables. Los horizontes de ambos materiales presentan un espesor que varía entre 10 y 20 cm, aunque los pedernales y calizas llegan a medir de 40 a 60 cm.

Este paquete es el que menos afloramientos tiene en la zona del Cañón, debido a que está cubierto aproximadamente en un 50% por material de talud.

En la columna 1, margen derecha, se logró medir un espesor de 9 m; en la columna 2 no se presentó esta unidad en la margen izquierda y en la margen derecha solo se identificaron escasos afloramientos de caliche y pedernal que se les asoció por su posición, con el paquete IIb. En la sección 3, en ambas márgenes está cubierto por talud; en la sección 4, margen izquierda, se le midió un espesor de 13 m, mientras que en la margen derecha está cubierto casi totalmente por talud.

En la sección 5, tanto en la margen derecha como en la izquierda, tiene un espesor promedio de 25 m, siendo este el lugar donde se midió el máximo espesor. Las características de este paquete son similares al paquete IIA, por lo que también se le asocia un ambiente de formación lacustre y escaso tirante de agua, sin mucho movimiento.

Esta subunidad le sobreyace a la subunidad IIb y le subyace a la subunidad IID, este contacto es transicional, no observándose claramente por estar cubierto por talud.

La presencia de fuertes cantidades de arcillas de tipo montmorilonítico en esta unidad implican también el riesgo de expansiones anormales y desintegración en presencia de agua. Superficialmente, los limos y arcillas se encuentran poco compactos, a veces deleznable y con un fuerte intemperismo.

Las rocas compactas como los pedernales y calizas se encuentran duros, con pequeñas fracturas sin continuidad y con espaciamientos moderados y con un ligero intemperismo superficial. La posición estructural de la secuencia es sensiblemente horizontal.

#### 4.1.2.4 Arenisca Pumítica Andesítica (UIId)

El paquete superior de la Unidad II está representado por una arenisca de grano grueso de color gris verdoso, constituida por fragmentos de pómez y cuarzo, empacados en una matriz arcillosa, presentando una estratificación laminar que varía de 2 a 5 cm. Se le observan rizaduras y graduación normal como estructuras primarias; en los lugares donde subyace a la Unidad Andesítica (UI) se encuentra fracturada, brechada y en ocasiones deformada debido al peso de la colada andesítica.

Este es el paquete que más fácilmente se diferencia dentro de la Unidad Estratificada (UII) y se presenta parcialmente en todo el Cañon.

En la columna 1, margen derecha, se le midió un espesor de 6 m, en la margen izquierda está cubierta parcialmente por talud, y solo aflora un espesor de 4 m.

En la sección 2 (columna 2) margen izquierda, alcanza un espesor de 8 m, y en la margen derecha no aflora.

En la columna 3 se midió aproximadamente 10 m en ambas márgenes. En la margen derecha de la sección 4 (columna 4) no se presenta, mientras que en la margen izquierda el espesor fue de 12 m.

En la columna 5, sólo midió 4 m, en la margen izquierda, y en la margen derecha está cubierto por talud.

Después que se depositó el paquete lacustre superior (UIIc) predomina el ambiente de lagos someros, paralelamente hay una emisión de magma andesítico-basáltico local, que se pone en contacto con aguas freáticas o superficiales, lo cual ocasiona una gran cantidad de material fragmentado que es depositado en horizontes delgados (base surge).

Esta subunidad descansa sobre el paquete UIIc en un contacto más o menos claro en buena parte del Cañon, y subyace a los derrames andesíticos en las zonas donde hay, y donde no, se presenta subyaciendo a la Unidad Superior Vulcanoclástica (Us).

Las areniscas se encuentran compactas, de dureza media a baja y con un ligero intemperismo. El macizo rocoso se encuentra afectado por fracturas verticales, continuas en la unidad que delimitan pequeños bloques de roca en conjunto con los planos de estratificación; los cuales aunque están en posición sensiblemente horizontal, se separan por los contactos entre las areniscas de grano grueso y las de grano fino.

Esta unidad se encuentra a una altura que no será afectada por el agua del embalse, sin embargo es importante ya que es la que soporta el peso de los basaltos y se llegó a observar que algunos de los deslizamientos del Cañon son propiciados por la debilidad de la arenisca.

#### 4.1.3 Unidad Basáltica-Andesítica (UI)

La unidad está formada por rocas andesíticas que megascópicamente presentan un color gris oscuro, de textura afanítica y localmente amigdaloidal; microscópicamente se definió como andesita y andesita basáltica de textura intergranular y pilotaxítica, con matriz microcristalina de plagioclasas (oligoclasa-andesina) y como componentes menores a la magnetita, zeolitas y olivino, ocasionalmente presenta una alteración a hematita.

La parte inferior que está en contacto con la Unidad UIId, presenta una estructura brechoide debido a que la colada de andesita fluyó por sedimentos húmedos, y la presión de los vapores que se generaron provocaron el brechamiento de los materiales.

En la margen derecha, los basaltos se presentan a lo largo de 2 km, en una superficie de 1 km<sup>2</sup> aproximadamente, desde 400 m aguas arriba del eje 1 hasta la confluencia de los Ríos Ipalco y Verde. Se le midió un espesor de 40 m en la sección 3, margen derecha.

En la margen izquierda, se presentan en una longitud de poco más de 2 kilómetros, desde 300 m aguas arriba del eje 1, hasta unos 200 m antes de llegar al eje 4. En la columna 2, margen izquierda, se le midió un espesor de 20 m; en la columna 3, alcanzó a medir 35 m, mientras que en la columna 4 presentó 20 m de espesor.

Observando la evolución que han tenido los materiales piroclásticos en los paquetes inferiores, se interpreta que estos derrames andesíticos son una etapa de esa evolución y que la actividad no cesa aquí, sino que continúa con emanaciones piroclásticas, dando origen a la Unidad Superior Vulcanoclástica.

Esta unidad descansa en la subunidad UIId y subyace a la Unidad Superior Vulcanoclástica.

La roca basáltica se presenta muy dura y compacta, con un ligero intemperismo; sin embargo, el macizo rocoso está afectado por tres familias principales que delimitan bloques inestables, que caen por el mecanismo de volteo o por la debilidad de la roca subyacente.

#### 4.1.4 Unidad Superior Vulcanoclástica (Us)

La Unidad Superior, en el área del Cañón, se encuentra constituida principalmente por material volcánico, representado por cenizas y lapilli, de color blanco y gris; así como por cantidades menores de material limo-arenoso, de origen híbrido y cementado parcialmente por carbonatos, se encuentran poco compactos y deleznable. En menor cantidad se presentan intercalaciones de caliza y pedernal de color verde o crema, compactos y duros, con espesores de 5 a 20 cm.

Esta unidad se presenta en las partes topográficamente altas del Cañón, y con un relieve plano (normalmente arriba de la cota 1700) (Plano 4.1).

El espesor medido en la margen derecha de la columna 1 fue de 20 m, sin llegar a la cima. En la columna 2, margen derecha, no se cortó esta unidad; mientras que en la margen izquierda solo aflora en pequeños lugares (no cartografiable). En la columna 3, no se presenta en ambos márgenes. En la columna 4, margen derecha, no se puede definir bien debido a que está cubierta la zona por material de talud y en la margen izquierda no está presente.

En la columna 5, margen izquierda, se midieron 35 m sin llegar a la cima, y en la margen derecha está cubierto casi totalmente por talud, pero debe tener un espesor de 20 m aproximadamente.

Esta unidad representa un fuerte evento de degasificación y eyección de cenizas riolíticas, que varían en su granulometría, desde ceniza fina hasta lapilli fino. Estos depósitos son de caída libre, depositados en cuerpos de agua sin movimiento, lo cual se refleja por las laminaciones que presentan, y que indican diferentes eventos consecutivos de emanación de material piroclástico; en una columna medida, de 7 m de espesor se identificaron hasta 48 emisiones individuales. En la zona del Cañón estos depósitos nos indican la parte terminal de una gran actividad volcánica.

La Unidad Superior Vulcanoclástica es la cima de la secuencia que se presenta en el Cañón; descansa en donde hay andesitas sobre estas, y cuando no, sobreyacen a la subunidad IId, que es el paquete superior de la Unidad Estratificada (UII).

Esta unidad presenta poca importancia desde el punto de vista geotécnico, ya que por estar ubicada en las porciones topográficamente altas no tendrá influencia para los trabajos de excavación de la cortina u obras auxiliares. Sin embargo, podría ser útil como banco de material arcilloso.

#### 4.1.5 Terrazas Aluviales (Qte)

Las terrazas están constituidas esencialmente por material arenolimoso de color pardo claro y con una mínima cantidad de arcillas, presentan baja compacidad y generalmente tienen graduación normal (fragmentos gruesos en la base y finos en la parte superior).

Se presentan a lo largo de todo el Cañón en ambas márgenes, con una forma alargada, y alcanzando espesores de 3-4 m aproximadamente. En un meandro del Río Verde, situado a 2 kilómetros aguas abajo del eje 1, existe una gran terraza aluvial que por debajo de las arenas-limosas presenta una mayor cantidad de gravas, procedentes de rocas andesíticas e ignimbríticas; aunque también contiene arenas y limos, pero en mucho menor proporción. Esta terraza tiene una superficie aproximada de 0.3 km<sup>2</sup> y, actualmente, es utilizada como un banco de material para agregados.

Estas terrazas se formaron por las antiguas zonas de inundación del río, que en tiempo de avenidas fuertes arrastra gran cantidad de material, y al perder energía la corriente lo deposita en estos lugares. En la actualidad se siguen formando estas terrazas solo que en lugares topográficamente más bajos a causa de la erosión del río.

La importancia geotécnica de estos materiales para la presa se centra en la posibilidad de utilizarlos como bancos de material, tanto para los filtros de la cortina como para agregados en la elaboración del concreto.

#### 4.1.6 Material de Talud (Qt)

Los taludes están formados principalmente por materiales limo-arenosos, producto de la desintegración de las rocas blandas existentes; así como por gravas y cantos de calizas, pedernales y, donde aflora la andesita, por bloques de roca de hasta 2 m<sup>3</sup> de tamaño. En la mayoría de los afloramientos se ha desarrollado mejor la vegetación y, por tanto, una capa de suelo orgánico, que permiten identificar mejor las zonas de derrumbes.

Generalmente se encuentra en estado suelto a poco compacto. Su espesor, en la mayor parte del Cañón, es pequeño; sin embargo, hay zonas como en el eje 2, donde se tienen datos de perforaciones, que indican que el espesor llega a ser de 20 m aproximadamente.

Esta unidad es importante desde el punto de vista geotécnico por el hecho de indicar las zonas donde han ocurrido los deslizamientos o desprendimientos de material con mayor frecuencia, indicando cual es el mecanismo de falla que se presenta en los materiales rocosos de la zona.

#### 4.1.7 Material de Acarreo (Qac)

Los acarreos están compuestos por fragmentos de Rocas Volcánicas Extrusivas (andesitas e ignimbritas) que varían en tamaño desde arenas medias hasta bloques; estos materiales están presentes en la zona del actual cauce de los Ríos Verde e Ipalco. Los fragmentos son transportados principalmente en la época de lluvias, cuando la corriente tiene su máxima capacidad de carga, y es posible transportar grandes fragmentos de roca; al bajar la energía de la corriente, este material tiende a acumularse.

Estos materiales son también utilizados como bancos de material, pero en menor escala que el banco de la terraza, ya que en época de estiaje se forman extensas planicies a lo largo del río en donde es posible introducir dragas o camiones para su extracción.

## 4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

### 4.2.1 Generalidades.

El Cañón de La Zurda tiene una longitud aproximada de 5 kilómetros; tiene una orientación E-W en el primer kilómetro, desde el Eje 5 hasta la confluencia de los Ríos Verde e Ipalco. En este punto sufre un quiebre moderado y toma una dirección SW 60 grados hasta que termina un kilómetro aguas abajo del Eje 1; presenta un ancho promedio de 300 m y profundidad de 100 m.

Las estructuras encontradas en el Cañón son semejantes a las que se observaron en el vaso, esto es lógico, ya que los procesos que originaron dichas estructuras no son locales, sino que se relacionan a un evento regional.

El Cañón de La Zurda se formó una vez depositada la colada lávica de andesitas, la cual, se interpreta, creó una velocidad de erosión diferencial. Primeramente se afectó la unidad lávica erosionándose por una zona de debilidad que bien pudo haber sido un área fracturada o con menor espesor, posteriormente se facilitó el paso del agua y con ello la erosión de los materiales menos resistentes, alcanzándose el nivel actual del cauce del Río Verde. Esta interpretación se apoya en el hecho de que las zonas protegidas por la andesita tienen el cañón más estrecho, mientras que en las zonas donde está ausente el cauce es más amplio y las laderas tienen una pendiente más suave.

El análisis estructural se realizó de la siguiente manera: se hizo una fotointerpretación previa, donde se marcaron los rasgos estructurales observables en las fotografías aéreas (blanco y negro) escala 1:10,000, proporcionadas por la S.A.R.H. después se hicieron recorridos en toda la zona del cañón para verificar la fotointerpretación y recolectar la mayor cantidad de datos posibles, donde lo permitieron los afloramientos y los accesos.

Los datos estructurales se describieron de acuerdo a las especificaciones de la sociedad internacional de mecánica de rocas (ISRM); posteriormente se vació la información en un plano topográfico escala 1:5,000; cabe mencionar que no se dibujaron en el plano todas las discontinuidades ya que en algunos casos se empastaba la información (Plano 4.1).

Por otro lado, se procesaron los datos de discontinuidades en diagramas estereográficos (red de Schmit) graficando los polos de los planos de discontinuidades; posteriormente se graficaron en un diagrama (red de Kalsbeek) para con esto efectuar un conteo e identificar diferentes familias en cada una de las unidades.

#### 4.2.2 Análisis Estereográfico de las Discontinuidades.

Este análisis de efectuo para cada una de las unidades que afloran en el Cañón.

##### 4.2.2.1 Fracturamiento.

##### Unidad III

Se lograron identificar tres sistemas de fracturamiento: SISTEMA ALFA (sistema principal), con una orientación preferencial NE-20 grados y practicamente vertical (Figura 4.1), en el diagrama estereográfico (Figura 4.2) se dibujan los arcos de las familias, se le asigna un echado de 86 grados hacia el SE, esto se hizo con el fin de poder representar el arco en el estereograma, ya que en la mayoría de los casos las fracturas son verticales e incluso se llega a invertir la orientación del echado, lo mismo sucede para las otras familias (verticales) de las demas unidades.

SISTEMA BETA (sistema secundario), con una orientación preferencial NW.

SISTEMA GAMMA, con una orientación preferencial E-W y practicamente vertical.

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE CONCENTRACION DE LOS PLANOS DE FRACTURAMIENTO (UNIDAD III) CAÑON "LA ZURDA , JAL."

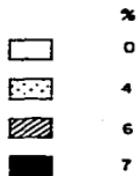
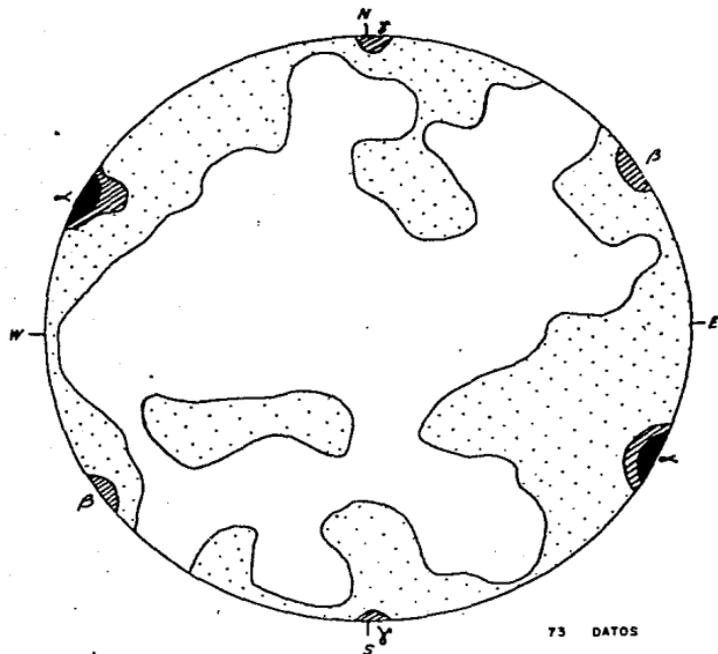
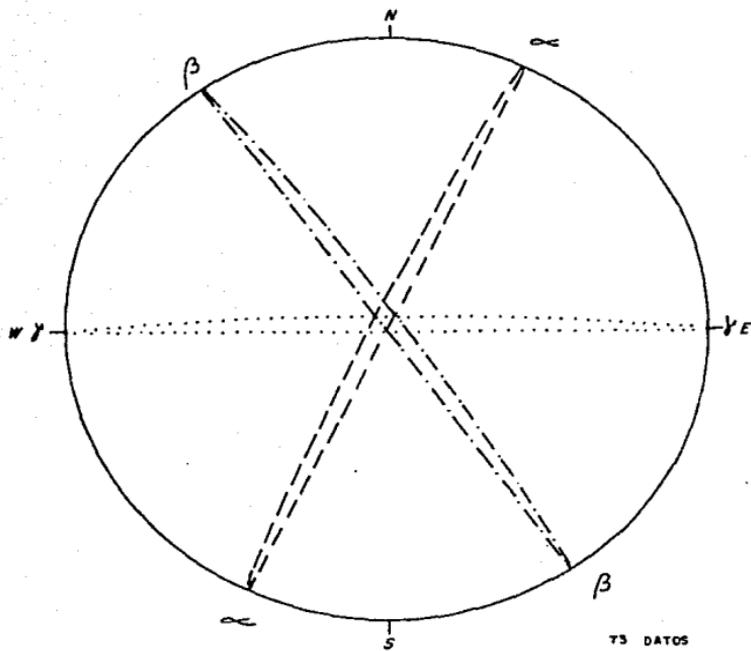


FIGURA 4.1

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE FRACTURAS (UNIDAD III) CANON "LA ZURDA", JAL.



$\alpha$  - NE 26° - 86° SE

$\beta$  - NW 36° - 86° NE

$\gamma$  - E 90° - 88° N

FIGURA 4.2

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE CONCENTRACION DE POLOS DE LOS PLANOS DE FRACTURAMIENTO (UNIDAD II) CAÑON "LA ZURDA, JAL."

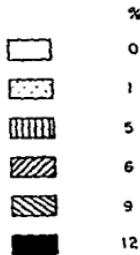
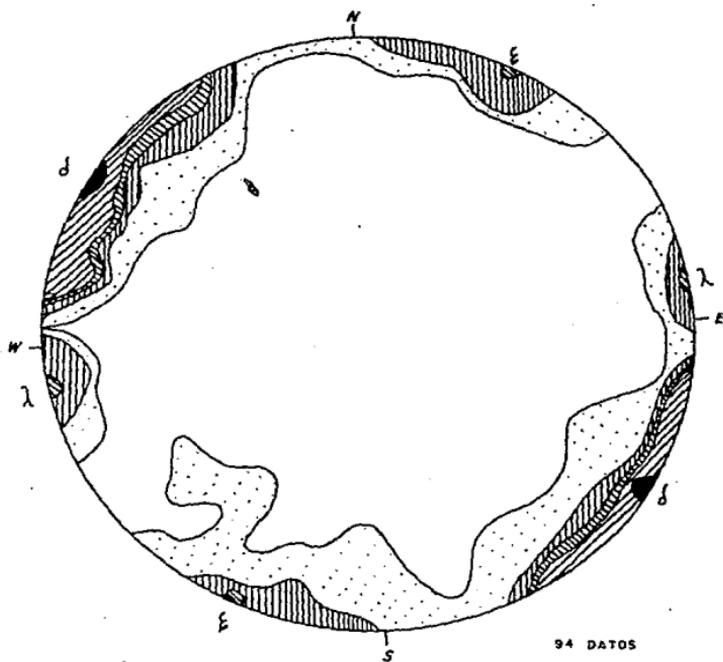
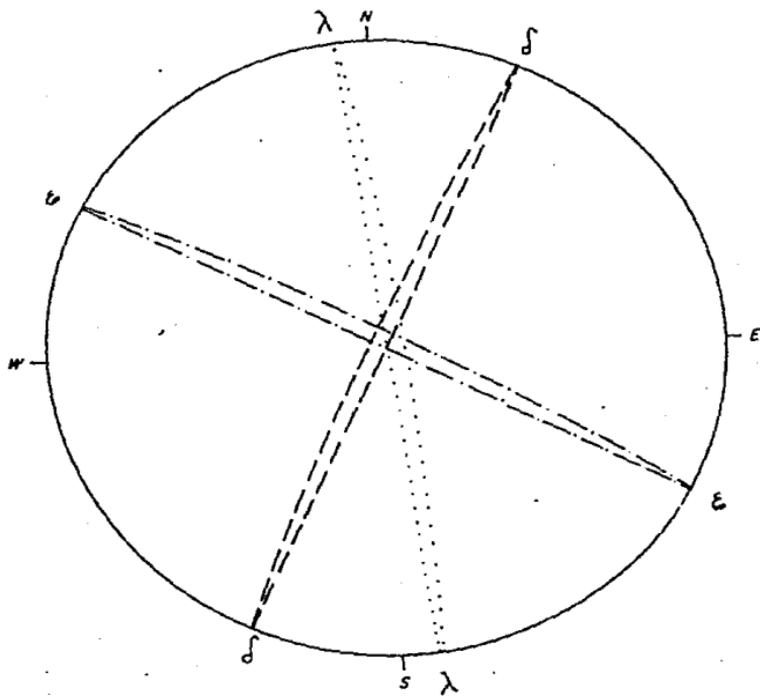


FIGURA 4.3

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE FRACTURAS (UNIDAD II) CAÑON "LA ZURDA", JAL.



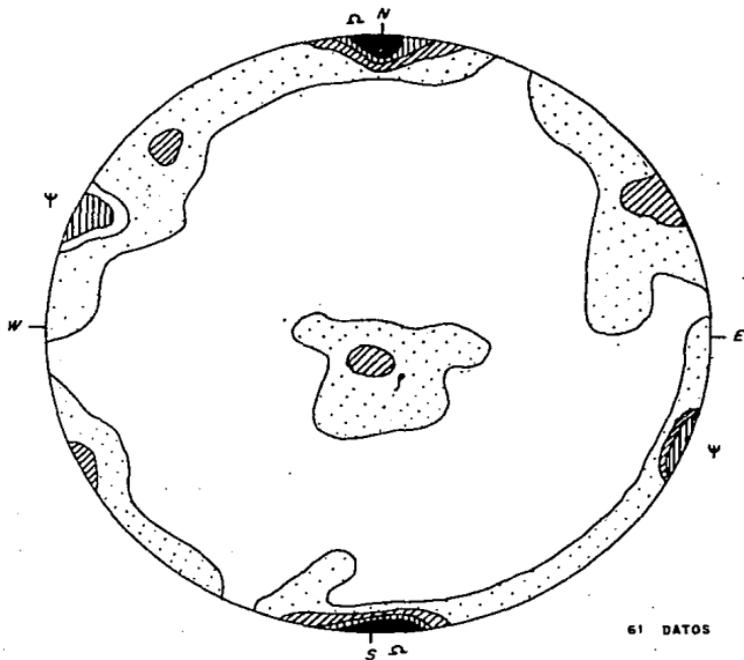
$\delta$  NE 26° - 88° NW

$\epsilon$  NW 54° - 87° NE

$\lambda$  NW 10° - 86° NE

FIGURA 4.4

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE CONCENTRACION DE POLOS DE LOS PLANOS DE  
 FRACTURAMIENTO (UNIDAD I) CAÑON "LA ZURDA", JAL.



61 DATOS

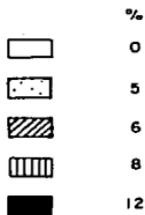
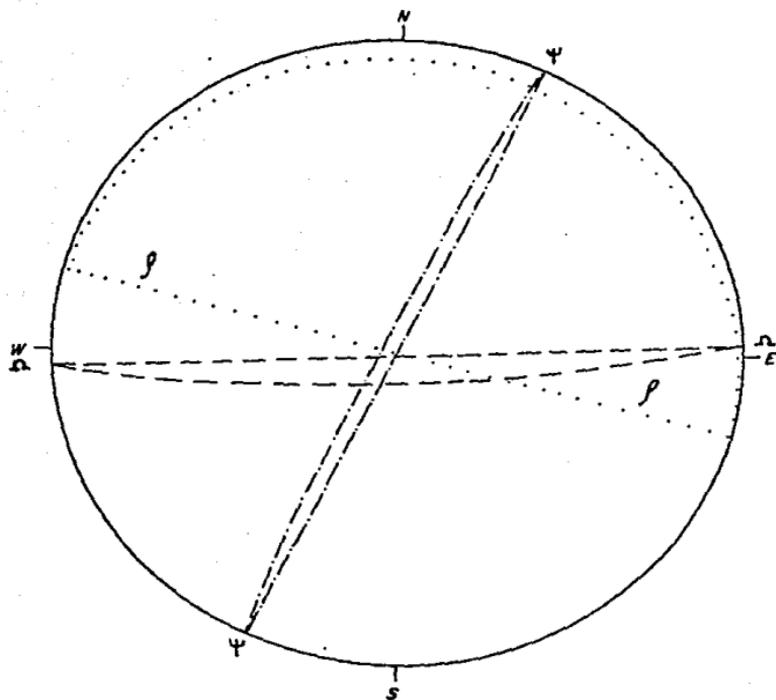


FIGURA 4.3

DIAGRAMA ESTEREGRAFICO DE LOS PRINCIPALES SISTEMAS DE  
FRACTURAS (UNIDAD I) CAÑON "LA ZURDA", JAL



$\Omega$  - NE 86° - 87° SE

$\Phi$  - NW 78° - 8° NE

$\Psi$  - NE 25° - 88° NW

FIGURA 4.6

## Unidad II

En esta unidad también se identificaron tres sistemas de fracturamiento; un sistema denominado DELTA, con una orientación NE 26 grados y buzando 88 grados al NW (Figuras 4.3 y 4.4). Este sistema coincide exactamente con el sistema ALFA considerado en la unidad III. Es importante mencionar que en campo no se observó continuidad de los sistemas ALFA de la unidad III y DELTA de la unidad II, pero al representarlos en los diagramas estereográficos se determina que ALFA y DELTA son el mismo sistema. Se identificó un segundo sistema llamado EPSILON con una orientación preferencial NW-54 grados y buzando 87 grados al NE. Por último, se identificó un tercer sistema llamado LAMDA que presenta una orientación preferencial NW-10 grados y buzando 86 grados hacia el NE.

## Unidad I

A la unidad I se le determinaron tres sistemas de fracturas (Figuras 4.5 y 4.6), el primero que es el más importante, denominado sistema OMEGA y con una orientación preferencial NE 86 grados y buzando 87 grados al sur; un segundo sistema llamado RHO que presenta una orientación preferencial NW-75 grados y buzando 8 grados hacia el NE, este sistema se observó en campo como un lajeamiento.

El sistema RHO de la unidad I presenta aproximadamente la misma orientación del sistema EPSILON de la unidad II, sólo que el echado es muy diferente; mientras que en el sistema EPSILON es prácticamente vertical, por lo que no se considera que sea un mismo sistema.

Se identificó un tercer sistema llamado PSI con una orientación preferencial NE-25 grados y buzando 88 grados hacia el NW.

### **4.2.2.2 Estratificación.**

Los datos de estratificación se representaron también en un diagrama estereográfico (Figura 4.7) y se manifiesta una clara concentración de los polos de los planos de estratificación hacia el centro, lo cual refleja una tendencia prácticamente horizontal de las capas, con echados que tienen un promedio de 6 grados, sin ninguna dirección preferencial; existen unos cuantos datos dispersos que presentan echados del orden de 20-30 grados pero son muy locales.

Las fallas localizadas en el Cañón no se integraron en los diagramas estereográficos, sino que se describirán en el capítulo siguiente.

DIAGRAMA ESTEREOGRAFICO DE POLOS DE LOS PLANOS DE  
ESTRATIFICACION (UNIDADES II, III) CAÑON "LA ZURDA", JAL.

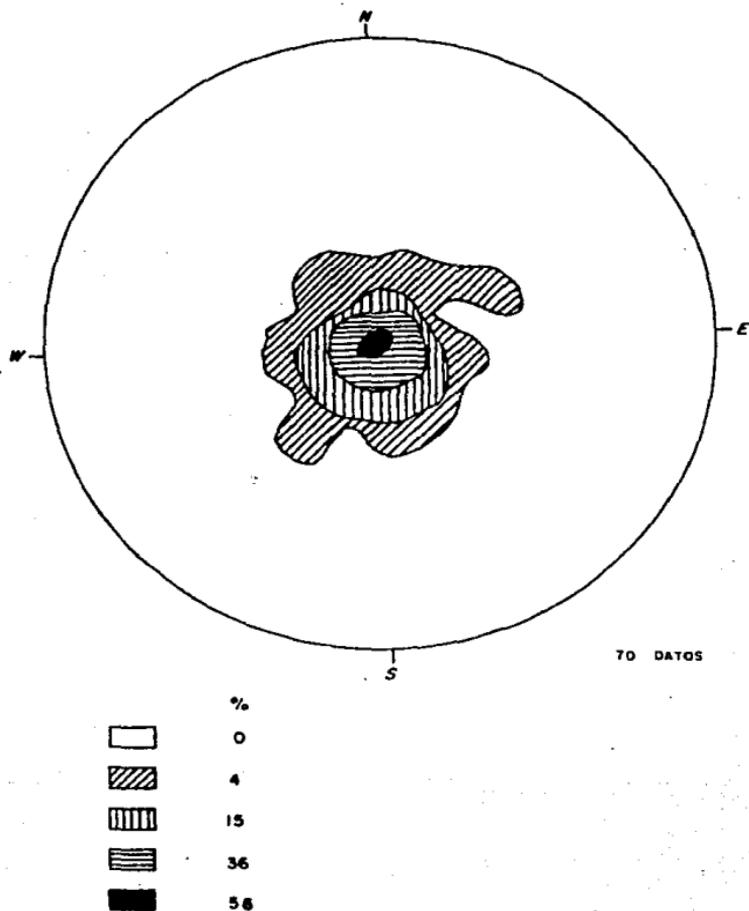


FIGURA 4

#### 4.2.3 Descripción de Fracturas y Fallas.

A continuación se hará una descripción de las discontinuidades basándose en las especificaciones que fija la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (I.S.R.M.) para cada una de las unidades.

Esta descripción se hace a partir de algunos parámetros: en primer lugar se identifica de que unidad rocosa se trata; el tipo de discontinuidad y la orientación de la misma; posteriormente se determina el espaciamiento, que es la distancia entre las fracturas de una misma familia; la continuidad, la rugosidad de las paredes, la resistencia a la compresión simple estimada, que depende en buena parte del grado de intemperismo; la apertura o separación; el tipo de relleno en las discontinuidades, la presencia de agua, y por último, la forma y el tamaño de los bloques que se delimitan por las familias de discontinuidades.

#### Unidad III

En esta unidad como se mencionó en el capítulo anterior se identificaron tres sistemas de fracturas, ALFA, BETA y GAMMA, los cuales presentan características similares y se representan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Frecuencia de las Características de los Sistemas de Fracturamiento (ALFA, BETA y GAMMA) en la Unidad III.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (ca)
E1	3	menor que 2
E2	3	2 - 5
E3	0	6 - 20
E4	3	20 - 60
E5	3	60 - 200
E6	23	200 - 600
E7	65	mayor que 600
CONTINUIDAD	%	RANGO (ca)
C	15	continua
SC	76	subcontinua
NC	9	no continua
CONTINUIDAD	%	RANGO (ca)
C1	3	menor de 1
C2	0	1 - 3
C3	44	3 - 10
C4	44	10 - 20
C5	9	mayor de 20
APERTURA	%	RANGO (mm)
A1	24	0.1 - 0.5
A2	6	0.5 - 10
A3	70	mayor de 10
RUGOSIDAD	%	DESCRIPCION
V	3	ondulada lisa
IV	90	ondulada rugosa
VII	4	plana rugosa
VIII	3	plana lisa
RELLENO		%
Arcilla		61
Silice		35
Carbonato		4

De esta tabla se puede resumir que el espaciamiento que predomina es aquel mayor a 6 m (E7), presentándose el 65% de las discontinuidades en esta clasificación; seguido por un espaciamiento menor, con un rango que va de 2 a 6 metros (E6) donde está el 23% de las discontinuidades; el resto está disperso en los otros rangos.

El 75% de las fracturas son subcontinuas (SC), el 15% continuas (C) y el 9% no continuas (NC); el 44% presenta una continuidad en un rango de 10-20 m (C4), el mismo porcentaje presenta otro rango de 3-10 m (C3); el resto, esta disperso en las otras clasificaciones.

El 70% de las fracturas tienen una apertura mayor de 10 mm (A3); el 6% están en un rango de 0.5 - 10 mm y el 24% son fracturas cerradas. El relleno de las fracturas en un 61% es arcilla, el 35% es sílice y solo un 4% es carbonato; no se encontraron evidencias de agua en los rellenos. Se puede decir que prácticamente todas las fracturas (90%) corresponden a la clasificación de rugosidad IV (ondulada rugosa).

## Unidad II

Se identificaron tres sistemas llamados DELTA, EPSILON y LAMDA, en la Tabla 4.2 se describen las características del sistema DELTA. Se observa que el espaciamiento que predomina está en los rangos (E4 y E5) los cuales varían de 20 a 60 cm y de 200 a 600 cm respectivamente; prácticamente todas las fracturas son subcontinuas (SC) alcanzando el 92% y solo una pequeña proporción continuas y no continuas. En general su continuidad es menor de 3 m, y solo un 12% están en un rango de 3 - 10 m. La apertura de este sistema varía de entre abierta (A2) y cerrada (A1) y solo unas cuantas llegan a ser mayores de 10 mm (A3).

Tabla 4.2 Frecuencia de las Características del fracturamiento del Sistema DELTA de la Unidad II.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (cm)
E3	4	6 - 20
E4	36	20 - 60
E5	42	60 - 200
E6	7	200 - 600
E7	11	mayor de 600
CONTINUIDAD	%	
C	6	continuo
SC	72	subcontinuo
NC	4	no continuo
CONTINUIDAD	%	RANGO (m)
C1	44	menor de 1
C2	44	1 - 3
C3	12	3 - 10
APERTURA	%	RANGO (mm)
A1	68	0.1 - 0.5
A2	21	0.5 - 10
A3	11	mayor de 10
RUGOSIDAD	%	
IV	24	ondulada rugosa
V	64	ondulada lisa
VII	12	plana rugosa

A la rugosidad se le identificaron tres diferentes formas; predomina el tipo ondulada lisa (V); le sigue el tipo ondulada rugosa (IV) y en menor proporción se presentan la forma plana rugosa (VII). En general no se encontró relleno en las fracturas, en muy pocos casos había algo de arcilla. Los bloques de roca que se forman son pequeños, ya que los determina la conjugación de los sistemas DELTA, EPSILON y los planos de estratificación.

En la Tabla 4.3 se describen las características de los sistemas EPSILON y LAMDA. Se hizo de esta manera puesto que las características de ambos sistemas son semejantes solo diferenciándose en el espaciamiento; puesto que mientras en el sistema EPSILON predomina (E5), con un rango de 60 - 200 cm, en el sistema LAMDA es mayor predominando E7, que es un espaciamiento mayor de 600 cm. Todas las fracturas se clasifican como subcontinuas, encontrándose el 55% en un rango de 3 a 10 m (C3) y el 45% con una continuidad menor a 3 metros. Prácticamente todas las fracturas se consideran cerradas (A1) y sólo unas cuantas corresponden a la clasificación entre abiertas (A2).

Tabla 4.3 Frecuencia de las Características del Fracturamiento de los Sistemas EPSILON y LAMDA de la Unidad II.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (cm)
E4	27	20 - 60
E5	46	60 - 200
E6	13	200 - 600
E7	14	mayor de 500
CONTINUIDAD	%	
C	0	continuas
SC	100	subcontinuas
NC	0	no continuas
CONTINUIDAD	%	RANGO (m)
C1	18	menor de 1
C2	27	1 - 3
C3	55	3 - 10
APERTURA	%	RANGO (mm)
A1	95	0.1 - 0.5
A2	5	0.5 - 10
A3	0	mayor de 10
RUGOSIDAD	%	
IV	54	ondulada rugosa
V	46	ondulada lisa

Esto hace que carezcan de relleno alguno, no se encontro evidencia de agua. La rugosidad que presentan es de dos tipos, aproximadamente el 50% corresponde al tipo ondulada rugosa (IV) y el otro 50% al tipo ondulada lisa (V). La superficie de las fracturas no es posible observarla claramente pero la roca se encuentra levemente intemperizada (III).

Las características de estratificación de la Unidad II se describen en la Tabla 4.4, y se resumen de la siguiente manera: presenta un espaciamiento predominante en un rango de 20 a 60 cm (E4), otro menor de 6 a 20 cm (E43) y un tercero escaso de 60 a 200 cm (E5). Se considera en general que es continua, llegando a ser subcontinua en algunas zonas donde se presenta en forma lenticular, estos lentes pueden llegar a medir de 3 a 20 m, siendo en la mayoría de los casos superior a los 20 m, se clasifican estas discontinuidades como onduladas lisas (V) sin descartar que existen planos de estratificación de otro tipo, solo que en mínima proporción.

Tabla 4.4 Frecuencia de las Características de la Estratificación de la Unidad II.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (cm)
E3	15	6 - 20
E4	79	20 - 60
E5	6	60 - 200
CONTINUIDAD	%	
C	92	continua
SC	8	subcontinua
NC	0	no continua
	%	RANGO (m)
C3	8	3 - 10
C4	10	10 - 20
C5	72	mayor de 20
RUGOSIDAD	%	
V	100	ondulada lisa

### Unidad I

Se identificaron tres sistemas llamados OMEGA, PSI y RHO. El sistema OMEGA resume sus características en la Tabla 4.5, de ésta se puede observar que su espaciamiento entre fracturas tiene una fuerte incidencia en los rangos E5 y E6, con 38 y 31% respectivamente; la continuidad se concentra de subcontinua a no continua, con 45 y 31%, estando en general en los rangos de 3 a 10 m (45%) y de 10 a 20 m (38%); la apertura de las discontinuidades en general son del orden de 0.1 a 0.5 mm (62%) y mayores a los 10 mm (38%); mientras que la forma del perfil de las paredes es ondulada lisa (79%), teniendo algunas ondulada rugosa (17%) y plana rugosa (4%), este fracturamiento es casi vertical.

Tabla 4.5 Frecuencia de las Características del Fracturamiento del Sistema OMEGA de la Unidad I.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (cm)
E2	7	
E3	7	6 - 20
E4	14	20 - 60
E5	38	60 - 200
E6	31	200 - 600
E7	3	mayor de 600
CONTINUIDAD	%	
C	24	continua
SC	45	subcontinua
NC	31	no continua
	%	RANGO (m)
C1	10	menor de 1
C3	45	3 - 10
C4	38	10 - 20
C5	7	mayor de 20
APERTURA	%	RANGO (mm)
A1	62	0.1 - 0.5
A2	0	0.5 - 10
A3	38	mayor de 10
RUGOSIDAD	%	
IV	17	ondulada rugosa
V	79	ondulada lisa
VII	4	plana rugosa

El sistema PSI resume sus características en la Tabla 4.6, en ésta se muestra que el espaciamiento entre las fracturas de este sistema tiene una mayor incidencia en el rango 200 - 600 cm (E6) con un 45%, mientras que el rango 20 - 60 cm (E4) congrega a un 20%, los demás rangos de espaciamiento (E2, E5 y E7) tienen 13, 10 y 10% respectivamente; la continuidad de las estructuras se califica de continua (60%) a subcontinua (40%) y se sitúa en los rangos de 3 - 10 m (50%) y de 10 - 20 m (40%), siendo un reducido porcentaje (10%) el que se sitúa en el rango de mayor a 10 m; en cuanto a su apertura, ésta se muestra cerrada en un 55% (0.1 - 0.5 mm) o abierta con un 35% (mayor a 10 mm) con un 10% en el rango intermedio (entreabierta), 0.5 - 10 mm); la rugosidad de las paredes de las estructuras se encuentra en dos rangos: ondulada rugosa, con un 65% y ondulada lisa, con un 35% al igual que el sistema OMEGA, éste es casi vertical y su intersección es una familia de líneas con la siguiente orientación SE 46 - 78 grados.

Tabla 4.6 Frecuencia de las Características del Fracturamiento del Sistema PSI de la Unidad I.

ESPACIAMIENTO	%	RANGO (cm)
E2	15	2 - 6
E4	20	20 - 60
E5	10	60 - 200
E6	45	200 - 600
E7	10	mayor de 600
CONTINUIDAD	%	
C	60	continua
SC	40	subcontinua
NC	0	no continua
	%	RANGO (m)
C3	50	3 - 10
C4	40	10 - 20
C5	10	mayor de 20
APERTURA	%	RANGO (mm)
A1	55	0.1 - 0.5
A2	10	0.5 - 10
A3	35	mayor de 10
RUGOSIDAD	%	
IV	65	ondulada rugosa
V	35	ondulada lisa

El sistema de fracturamiento RHO resume sus características en la Tabla.4.7, en dicha tabla se muestra que el espaciamiento es muy cerrado ya que el 66% se encuentra en el rango de 2-6 cm (E2), en el rango cerrado se ubica el 25% de los datos (E3), mientras que en el rango amplio se ubica el 9% (E4); la continuidad de las estructuras varía de subcontinua, con el 83% (SC), a continua, con el 17% (C) y se ubica en el rango de 3-10 m, con un 75% (C3) mientras que el resto (25%) se ubica en el rango de 1-3 m (C2); su apertura varía en rango de cerrada con 75%, 0.1 - 0.5 mm (A1) a entreabierta con 25%, 0.5 - 10 mm (A2); la rugosidad de sus paredes se identificó como plana rugosa con 66% de las estructuras identificadas y ondulada rugosa con un 34%. EL sistema RHO es casi horizontal y se identifica fácilmente por su lajeamiento, en general tiene una distribución reducida y localizada, aunque se puede encontrar a todo lo largo del Cañón.

Tabla 4.7 Frecuencia de las Características del Fracturamiento del Sistema RMO de la Unidad 1.

ESPACIAMIENTO	1	RANGO (cm)
E2	66	2 - 6
E3	25	6 - 20
E4	9	20 - 60
CONTINUIDAD	1	
C	17	continua
SC	83	subcontinua
	1	RANGO (m)
C2	25	1 - 3
C3	75	3 - 10
APERTURA	1	RANGO (mm)
A1	75	0.1 - 0.5
A2	25	0.5 - 10
RUGOSIDAD	1	
IV	34	ondulada rugosa
VII	66	plana rugosa

Por otro lado, en el área de estudio del Cañon de La Zurda se presentan muy pocas fallas, ya que las rocas no han sufrido ningún evento tectónico de importancia desde su depósito; de hecho tan solo han sufrido reajustes gravitacionales, así como la influencia del vulcanismo que llega a afectarlas localmente.

Las principales fallas observadas en la zona del Cañon se cartografiaron en el Plano 4.1 y sus características geotécnicas se describen a continuación:

#### - Falla F1

En la zona del arroyo que desemboca al Río Verde por su margen izquierda inmediatamente aguas arriba del Eje 1, se presenta una falla en el contacto entre las andesitas (UI) y las areniscas laminares de la Unidad UIId.

# ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Se trata de una falla de desplazamiento normal, su orientación es SE 80 grados, con 72 grados de inclinación hacia el este; el salto de la falla es de 5 m y presenta una zona de alteración de cerca de dos metros, en donde las areniscas están fracturadas y alteradas, con pequeñas fallas secundarias y el basalto presenta un aspecto brechoidal. Esta falla tiene continuidad solamente dentro de la Unidad II, ya que al llegar a las areniscas de la Unidad III se pierde.

## - Fallas F2 y F3

Estas fallas están ubicadas 200 m de la falla F1 en dirección aguas abajo; son de tipo normal, la falla F2 tiene una orientación de NE 55 grados con inclinación de 72 grados hacia el oeste y la F3 su orientación es de NE 40 grados con inclinación hacia el Este. El salto de las fallas es del orden de 5 m, tan solo presenta continuidad en la Unidad II y delimita un pequeño bloque caído.

## - Fallas F4 y F5

Ambas fallas se presentan en la margen izquierda del Río Verde, frente de la confluencia de los Ríos Verde e Ipaico. Estas fallas no se manifiestan claramente en la superficie, y se han inferido puesto que existe un bloque de roca que se ha movido cerca de 15 m entre dos escurrimientos; estas estructuras son aproximadamente paralelas y tienen una orientación aproximada de SE 84 grados.

## - Falla F6

Situada a escasos 100 m aguas arriba de las fallas antes descritas; se observa claramente en la parte baja de un escarpe de roca. Se presenta en el contacto entre la Unidad II y III y tiene una orientación de NE 35 grados con 78 grados de inclinación al SE; su salto es del orden de 3 m y tiene una continuidad visible de cerca de 10 m, ya que se desconoce su persistencia hacia el interior de la Unidad III; la superficie de la falla es plana y rugosa; en algunas zonas se encuentra cerrado y en otras hasta 3 cm de apertura, y con un relleno arcilloso.

## - Falla F7

Las razones para marcar esta falla son el bloque inclinado que se observa en el gran cantil de roca ubicado aguas arriba del Eje 5; el cual presenta una inclinación de cerca de 20 grados en la estratificación, que contrastan con el echado de unos 5 grados en la estratificación en la parte Oeste del arroyo. Por lo cual se ha considerado que el bloque sufrió un ligero basculamiento. Sin embargo, no se logró obtener mayor información del plano de falla por encontrarse con abundante vegetación el arroyo. Debe mencionarse que en las fotografías aéreas se observa un notable alineamiento de este arroyo hacia aguas arriba que apoyan la existencia de esta discontinuidad.

### 4.3 ESTUDIO DE LAS ARCILLAS Y LIMOS

Dada la importancia geotécnica que representan las arcillas y limos de la Unidad II y Us, se llevó a cabo una serie de actividades, tanto de campo como de gabinete, para determinar su distribución en cada columna a lo largo del Cañón y Vaso del proyecto; así como para conocer sus características mineralógicas que permitieran un mejor entendimiento del problema de la expansividad de las arcillas de la Unidad II.

El presente subcapítulo describe la metodología seguida y los resultados obtenidos.

#### 4.3.1 Distribución de Arcillas y Limos.

Durante los trabajos de campo se midieron y muestrearon con detalle todos los horizontes de granulometría fina (arcillas y limos) presentes en la Unidad II. Esta actividad se efectuó al medir las columnas estratigráficas; así fue posible detectar cualitativamente que las subunidades IIa y IIc contienen el mayor porcentaje de finos, mientras que la subunidad IIb los tiene en muy baja proporción y la II d no los presenta.

Una vez que se tuvieron ubicados los horizontes de material fino en cada subunidad se calculó, por sección, el porcentaje que ocupan los finos por subunidad, así como para toda la Unidad II. Se hace hincapié en el sentido de que se efectuaron dos cálculos: primero considerando porcentaje de los materiales finos y no finos de las mediciones directas de campo y después, en el segundo cálculo se consideró que en las zonas donde el talud o vegetación impidieron las mediciones la proporción de finos y no finos es de uno a uno, o sea 50% y 50%.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en el siguiente cuadro:

SECCION	UNIDAD O SUBUNIDAD	% AFLORENTE	% CONSIDERANDO TALUD
1 - 1	Ila	25.9	25.9
	Iic	51.4	50.2
	UII	28.3	36.8
1 - D	Ila	40.0	40.0
	Iic	36.0	36.0
	UII	10.5	11.8
2 - 1	Ila	51.2	51.2
	Iic	73.2	61.5
	UII	37.0	39.1
2 - D	Ila	32.2	32.2
	Iic	-	50.0
	UII	26.8	31.2
3 - 1	Ila	20.0	20.0
	Iic	-	50.0
	UII	11.9	32.5
3 - D	Ila	25.0	25.0
	Iic	-	51.3
	UII	33.5	35.8
4 - 1	Ila	50.3	50.3
	Iic	12.1	17.9
	UII	25.7	31.0
4 - D	Iic	-	50.0
	UII	21.9	41.6
5 - 1	Iic	40.3	41.4
	UII	30.0	31.8
5 - D (Esc.)	Iic	20.0	20.0
	UII	36.5	36.5
5 - D (Ver.)	Ila	41.4	41.4
	Iic	37.5	37.5
	UII	31.5	31.5
Promedio	Ila	35.75	35.75
	Iic	38.64	42.34
	UII	28.69	32.69

A fin de tener una idea aproximada del porcentaje que ocuparían las arcillas y limos en los ejes propuestos para la cortina, y debido a que en éstos sitios no se midieron las secciones con detalle, se efectuó una interpolación de valores, así para el Eje 1 se promediaron los porcentajes obtenidos en las Secciones 1 y 2, para los Ejes 2 y 3 se hizo el promedio de los porcentajes en las Secciones 2 y 3, para el Eje 4 se utilizó el promedio de las Secciones 4 y 5 y para el Eje 5 el promedio de las Secciones en el Eje 5; en los promedios para los Ejes 4 y 5 no se consideraron los resultados de la Sección 5, Margen Derecha (vereda) por considerarla alejada de los ejes. Los resultados se muestran en el cuadro que a continuación se presentan:

EJE	UNIDAD O SUBUNIDAD	% AFLORANTE	% CONSIDERANDO TALUD
1	Ila	37.32	37.3
	Iic	40.15	49.4
	II	27.70	29.7
2 y 3	Ila	32.1	49.8
	Iic	18.3	53.2
	II	27.3	34.7
4	Ila	31.8	31.8
	Iic	12.1	42.3
	II	23.3	35.2
5	Ila	0	0
	Iic	30.2	30.7
	II	30.0	34.2

#### 4.3.2 Pruebas de Laboratorio.

Una vez que se tuvieron las proporciones de arcillas y limos por subunidad y su distribución a lo largo del Cañón y en vista de que fue necesario identificar el grupo (o grupos) que compone a las arcillas, se procedió a realizar ensayos en laboratorio. Primeramente las muestras se sometieron a Análisis de Difracción de Rayos X para una identificación cualitativa; en vista de que los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya no se sometieron a Análisis Térmico Diferencial, pues no se considero necesario; este segundo tipo de pruebas se tenía como una opción en el caso de los análisis inicialmente citados arrojaran resultados poco claros o negativos.

Posteriormente, las muestras se sometieron a Analisis Químicos por Fluorescencia de Rayos X, con el objeto de tener su composición química (en porcentaje de óxidos). Finalmente con los últimos resultados se efectuó un analisis normativo, con la finalidad de conocer el porcentaje de minerales presentes en las muestras.

A continuación se describen los métodos utilizados y sus resultados.

#### 4.3.2.1 Difracción de Rayos X.

Este método consiste en la identificación de elementos y minerales en substancias individuales o mezclas, aunque no proporciona concentraciones.

La técnica consiste en pulverizar en un mortero un poco de muestra, para poder espolvorearla sobre un portaobjetos al que previamente se le ha cubierto ligeramente con vaselina. Posteriormente se fija el portaobjetos a un disco provisto de una cubierta protectora, para evitar fugas de radiación al exterior. El disco con el portaobjetos se hace girar contra un cañón de Rayos X, a fin de que se difracten los rayos a partir del mayor número de caras cristalográficas de la muestra. Simultáneamente la graficadora, anexa al aparato, dibujará picos donde se reciba difracción y los trazará contra el ángulo de giro del disco. Una vez que el disco llega a los 60 grados se apaga la fuente de poder y se retira la muestra.

La gráfica obtenida se analiza, apoyándose con tablas de "picos" ya conocidos. Una substancia o compuesto se identifica por tres de sus valores de 2 TETA más prominentes. La intensidad de los "picos" en la gráfica no es tan importante como su posición, pues la intensidad de éstos es sólo un factor de la escala que se utiliza en la maquina; la escala se puede ajustar para magnificar o aumentar los registros de la difracción cuando son pequeños, difíciles de distinguir o muy grandes.

A manera de ejemplo ilustrativo se tratara brevemente a la gráfica de la muestra MD-103, perteneciente a la Subunidad IIC, colectada en la Sección 3, Margen Derecha, en la gráfica se identifican los minerales que a continuación se citan con su respectivo ángulo 2 TETA.

ANGULO 2 TETA (GRADOS)	MINERAL
6	Montmorillonita (cálcica)
6.8	Illita (sódica)
9.7	Pirofilita
17.7	Montmorillonita (cálcica)
19.3	Pirofilita
19.8	Montmorillonita (cálcica)
20.1	Pirofilita
20.7	Cuarzo
22.9	Pirofilita
23.5	Calcita
26.4	Pirofilita
27.2	Illita (sódica)
29.3	Pirofilita-Calcita
31.3	Calcita
34.9	Caolinita
35.9	Calcita
36.7	Cuarzo
38.5	Caolinita
39.3	Cuarzo
40.7	Cuarzo
42.3	Cuarzo
45.2	Caolinita
51.5	Cuarzo

En general los minerales identificados con mayor incidencia en los análisis son los siguientes: calcita, montmorillonita, illita, caolinita, limonita, hematita, cuarzo, pirofilita, palagaskita, bramalita y albita.

Los análisis fueron realizados en el laboratorio de la Universidad de Texas en El Paso, Texas, por el Dr. Filiberto Gomez Parra.

#### 4.3.2.2 Fluorescencia de Rayos X.

Este método consiste en la identificación cuantitativa de elementos y óxidos en sustancias individuales o mezclas.

La técnica empleada consiste en pulverizar la muestra en un pulverizador de acero de tungsteno en forma de plato, con anillos interiores del mismo material, la muestra será pulverizada al girar rápidamente los anillos contra la caja por acción de un excéntrico.

A continuación el material, así pulverizado se comprime en

botones de aluminio rellenos con celulosa (pellets) en una prensa que alcance cinco toneladas. La cantidad de muestra requerida es de unos dos gramos por pellet. Una vez que se identifica cada pellet se inserta en un revólver donde se irradia con Rayos X, por una fuente de alto poder. La maquina analizadora tiene una computadora e impresora integrada, a la computadora se le alimenta previamente con las características de fluorescencia de unas seis muestras representativas del material por analizar, cuya composición química es ya conocida y actúan como estandar de referencia.

Los óxidos y compuestos que se identificaron en las muestras fueron los siguientes:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{CaCO}_3$ .

Se hace la aclaración de que los óxidos  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{FeO}$ , aunque se identificaron no se incluyen en las listas que se presentan, debido a que la composición normativa no los requiere, es por ello que la suma de los porcentajes difiere de 100.00%. Por otro lado en el  $\text{CaCO}_3$  ya está contenido  $\text{CaO}$  y  $\text{CO}_2$ .

En la Tabla 4.9 se presenta el promedio de los porcentajes obtenidos, así como la composición normativa de estos promedios, ordenados por subunidad y unidad en el Cañon; en el vaso solo se mostró en la Unidad Superior.

#### 4.3.2.3 Composición Normativa.

Una vez conocida la composición química de las muestras de arcillas y limos recolectadas, se calculó el porcentaje de los minerales que en teoría se encuentran en las muestras. Para tal cálculo se utilizó el método del Cálculo Normativo, esta técnica consiste en identificar la composición química de minerales patrón, y por otro lado (mediante otros análisis) detectar los óxidos que componen una muestra; con esta información y conociendo el orden de formación de los minerales, los óxidos son recalculados a moléculas simples de minerales; los cuales son minerales formadores de roca reales.

Tabla 4.9

COMPOSICION QUIMICA EN %						
O X I D O	U I I a	U I I b	U I I c	U I I	Us	Us VASO
Si O <sub>2</sub>	44.78	55.89	50.64	50.29	64.11	51.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.50	12.58	11.67	11.15	11.27	8.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.56	4.46	4.30	3.98	4.09	3.16
Ca O	19.01	9.39	12.48	13.91	6.53	14.38
Mg O	1.75	2.81	3.07	2.44	2.16	4.13
K <sub>2</sub> O	2.63	3.47	2.88	3.01	2.89	2.59
Na <sub>2</sub> O	1.02	0.94	0.77	0.93	1.31	0.68
H <sub>2</sub> O	7.52	7.21	6.78	7.24	5.38	11.44
C O <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca C O <sub>3</sub>	28.50	13.09	19.37	20.62	7.35	24.30
T O T A L	89.77	96.75	92.59	92.95	97.74	96.51

COMPOSICION NORMATIVA EN %						
CALCITA	28.52	13.10	19.39	20.64	7.36	24.32
MONTMORILONITA	7.47	8.63	8.07	8.03	7.52	10.59
ILLITA	22.23	29.33	24.34	25.44	24.43	21.89
ALBITA	4.91	6.72	6.51	7.05	9.67	2.50
ANORTITA	0.00	0.00	2.86	0.00	0.00	0.00
CAOLINITA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LIMONITA	3.96	4.96	4.78	4.43	4.55	3.52
HEMATITA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CUARZO	29.62	35.22	30.88	31.52	44.28	35.52
AGUA	5.59	4.54	4.28	4.91	3.17	8.86
T O T A L	102.31	102.51	101.11	102.02	100.97	107.20

Así, de conformidad con los resultados obtenidos en los análisis de Difracción de Rayos X, el grupo de minerales que se eligió en el cálculo normativo de las arcillas y limos, en orden de formación, es el siguiente:

Calcita:	Ca CO <sub>3</sub>
Montmorilonita:	3H <sub>2</sub> O 2Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 8SiO <sub>2</sub>
Illita:	4H <sub>2</sub> O K <sub>2</sub> O 4Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 16SiO <sub>2</sub>
Albita:	Na <sub>2</sub> O Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6SiO <sub>2</sub>
Caolinita:	2H <sub>2</sub> O Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2SiO <sub>2</sub>
Limonita:	2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 3H <sub>2</sub> O
Hematita:	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Cuarzo:	SiO <sub>2</sub>
Agua:	H <sub>2</sub> O

En el anexo de Composición Química y Normativa, al final del texto, se puede consultar la composición química normativa de las muestras analizadas. La Tabla 4.1 presenta un resumen de la composición química normativa de los promedios de los óxidos de las muestras arregladas por unidad litológica; los resultados de la columna de la derecha corresponden a muestras colectadas en el área de embalse en las arcillas de la Unidad Superior.

La Tabla 4.10 presenta el promedio de la composición normativa de las arcillas, arreglada de la misma forma que la Tabla 4.9.

Tabla 4.10

MINERAL	C A R B O N A T O S					
	UIIa	UIIb	UIIc	UII	Us	Us
Calcita	29.34	13.10	19.38	20.97	7.35	24.46
Montmorilonita	7.28	7.82	7.58	7.55	7.47	11.83
Illita	20.61	23.29	20.89	21.69	24.05	18.75
Albita	4.84	6.06	6.40	5.65	5.35	2.67
Acetita	0.97	3.37	1.91	2.99	2.68	0.60
Caolinita	0.19	0.06	0.03	0.28	0.00	0.60
Limonita	3.76	3.40	4.20	3.72	4.54	3.15
Hematita	0.16	1.35	0.50	0.69	0.00	0.32
Cuarzo	29.90	37.11	31.51	33.00	45.26	36.51
Agua	6.20	4.53	4.42	5.17	3.19	9.03
Total	103.25	100.09	97.62	100.81	100.89	107.92

Como es de esperarse, los resultados de la composición normativa de los promedios de los óxidos es muy similar a los resultados de promedios de composición normativa.

En general la composición normativa refleja un alto porcentaje en el contenido de cuarzo, illita y calcita, valores moderados de montmorilonita, albita, limonita y agua; así como bajos o nulos porcentajes de anortita, caolinita y hematita. Lo cual concuerda con algunos autores (Huang, 1968) en el sentido de que los materiales arcillosos (y lutitas) en general están compuestos un tercio de cuarzo, un tercio de minerales arcillosos y el tercio restante de sustancias varias.

La presencia del cuarzo está íntimamente ligada con el ambiente geológico de la región, donde abundan las rocas ígneas ácidas (en particular riolitas e ignimbritas riolíticas); la calcita tiene su origen en carbonatos que se encontraban en suspensión en las aguas; la presencia de la illita y la montmorilonita se interpreta como resultado del intemperismo y/o lixiviación de rocas ígneas ácidas (estos materiales son abundantes en la región y están representados por las ignimbritas ácidas y riolitas, así como por pomez y cenizas ácidas).

El significado geotécnico de la presencia de arcillas y las proporciones en que se encuentran se discute ampliamente en el Capítulo 5.

En la zona del Cañon de La Zurda se han planteado dos problemas geológico-geotécnicos a estudiar: el primero de ellos, denominado Problema I, se refiere al deslizamiento de la ladera por la expansión de las capas de arcilla bentonítica de la Unidad Estratificada (III); el llamado Problema II se refiere a la posibilidad de tubificación y hinchamiento de la roca por sub-presiones.

Para un mejor entendimiento de estos problemas se programaron una serie de actividades que permitieran profundizar en el entendimiento de la Geología del sitio.

En primer término, la información obtenida del estudio geológico superficial del Cañon, permitió tener un conocimiento adecuado en lo referente a las unidades litológicas, en cuanto a su distribución, estratigrafía, petrografía, características geotécnicas y geohidrológicas; así como el comportamiento estructural de los macizos rocosos. Con esta información superficial fue posible elaborar un modelo geológico, que resulta básico para poder estudiar el comportamiento geotécnico de las rocas y macizos rocosos durante la construcción y operación de la futura presa.

Sin embargo, el modelo geológico superficial por sí solo, no proporciona toda la información necesaria para el entendimiento de su comportamiento mecánico; por lo que es necesario complementarlo con estudios del subsuelo, a través de métodos directos o indirectos, que afinen dicho modelo; así como de estudios de Mecánica de Rocas y Suelos para establecer el modelo geomecánico del sitio.

Dentro de las actividades que se llevan a cabo como complemento de este estudio geológico, la S.A.R.H. realiza trabajos de investigación del subsuelo por medio de prospecciones geofísicas, sondeos directos y registros geofísicos en pozos; con los cuales se podrá tener un mejor conocimiento de la geología del subsuelo.

Para conocer el comportamiento mecánico de los materiales se realizó, en esta etapa, una serie de pruebas de laboratorio para determinar algunas de las propiedades físicas y mecánicas de la roca "intacta" en muestras de superficie y de algunos sondeos, las cuales sirvieron de apoyo al análisis de los problemas mencionados.

Este capítulo presenta, en primer término, las pruebas de laboratorio realizadas y los resultados obtenidos de sus propiedades; posteriormente se clasifica a la roca "intacta" ingenierilmente con la clasificación de Deere y Miller (1966) y se establece una certificación geotécnica de las unidades litológicas de acuerdo con las normas de la Descripción Geotécnica Básica (RBD), establecida por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1979). Por último, se presenta un análisis de los derrumbes en la zona del Cañón, así como el de los dos problemas geotécnicos planteados.

## 5.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECANICAS DE LA ROCA INTACTA

De acuerdo a las características de los materiales existentes en el área de estudio, se llevó a cabo un programa de pruebas de laboratorio para determinar propiedades físicas y mecánicas de las rocas; a continuación se resumen las propiedades medidas y el número de pruebas realizadas.

PROPIEDAD	No. DE PRUEBAS
- Densidad	110
- Resistencia a la carga puntual	85
- Resistencia a la compresión simple	106
- Módulo de elasticidad estático	89
- Módulo de elasticidad dinámico	137

A la Unidad III, se le practicaron 6 análisis granulométricos y se determinaron los límites líquidos e índices plásticos de la fracción fina, cuyos resultados se presentaron en el Capítulo 5.

Las muestras fueron, en su mayoría, obtenidas de afloramientos superficiales y recolectadas durante la medición de las columnas estratigráficas, por lo que siempre estarán referidas a una sección y una margen, así como un número de muestra. También se lograron recolectar muestras de los núcleos de los dos primeros sondeos perforados por la S.A.R.H., los cuales dieron información interesante de las propiedades de las rocas; estas muestras se refirieron según su número de barrenos y su profundidad.

Para las pruebas de resistencia a la compresión y módulos de elasticidad, las muestras superficiales fueron labradas de forma prismática, con longitudes del orden de 11 a 12 cm y lados de 5 a 5.5 cm, tratando de conservar siempre la Relación de Esbeltas de 2 a 1. Los núcleos de los barrenos se obtuvieron en diámetro NQ (5.5 cm), por lo que se contaron de 12 a 13 cm para conservar la misma relación.

Para las pruebas de densidad y carga puntual se escogieron muestras pequeñas sin forma geométrica definida.

### 5.1.1 Pruebas de Laboratorio

En cada una de las pruebas realizadas se mencionará brevemente la metodología que se emplea para su obtención y el procedimiento para el cálculo de las propiedades físicas y mecánicas.

- A) DENSIDAD
- B) RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE Y MODULOS DE ELASTICIDAD ESTATICOS
- C) RESISTENCIA A LA CARGA PUNTUAL
- D) MODULOS DE ELASTICIDAD DINAMICOS

### 5.1.1.1 Densidad.

El objetivo de esta prueba fue el de medir la densidad de los sólidos de los especímenes recolectados. El método utilizado fue el de desplazamiento de agua. Este método tiene la ventaja de que no requiere de muestras de forma regular, pero con la limitante de que sólo puede ser utilizado en muestras de roca que no se desmenuzen o desintegren apreciablemente al sumergir en agua o al secado en horno.

El procedimiento fue el siguiente:

- a) Primeramente se pesó la muestra en estado seco ( $W_s$ ).
- b) La muestra inicialmente se saturó por inmersión en agua, durante un período de al menos 24 horas y midiéndose la temperatura del agua ( $T$ ).
- c) Posteriormente la muestra se transfirió bajo el agua a una canastilla que pende de una balanza, y se pesó. El peso sumergido ( $W_{sum}$ ) se determinó con una aproximación de 0.1 g, y se obtuvo de la diferencia entre el peso saturado sumergido de la muestra más la canastilla y la canastilla sola.
- d) Finalmente la muestra fue removida del recipiente con agua y su superficie ligeramente secada con un trapo húmedo (para eliminar el exceso de agua), una vez hecho esto se colocó en la balanza y se obtuvo el peso saturado ( $W_{sat}$ ).

Con los datos así obtenidos se efectuaron los siguientes cálculos:

- a) Magnitud del volúmen (volúmen de sólidos,  $V_s$ ).

$$V_s = (W_{sat} - W_{sum}) \text{ GAMA } w$$

donde:

GAMA  $w$  es la densidad del agua.

- b) Densidad de sólidos de la roca ( $S$ )

$$S = W_s / V_s$$

- c) A continuación se afectó al valor obtenido ( $S$ ) por un factor de corrección que depende de la temperatura del agua ( $F_c$ ).

$$F_c = 1 + ((T-4)/575.5) \exp 1.75$$

- d) Así la densidad de sólidos corregida por la temperatura del agua ( $S_s$ ) quedará:

$$S_s = S(F_c)$$

### 5.1.1.2 Compresión Simple y Deformabilidad.

Esta prueba consiste en aplicar a especímenes de roca una carga axial sin confinamiento, y tiene como objetivo conocer la resistencia máxima que pueden soportar los materiales así como el comportamiento del material conforme se aplica la carga. En general se utilizaron muestras prismáticas de bases paralelas más o menos cuadradas con lados de 5 a 6 cm y una altura de unos 10 a 13 cm (procurando que la relación altura-diámetro fuese del orden de 2).

El equipo utilizado fue el siguiente:

- Un gato hidráulico con capacidad de 50 toneladas conectado a una prensa cuyo émbolo tiene un área de 72.4637 centímetros cuadrados y dos platinas circulares, una horizontal y otra horizontal ligeramente móvil.
- Un gato hidráulico con capacidad de 12.5 toneladas conectado a una prensa cuyo émbolo tiene un área de 17.81 centímetros cuadrados y dos platinas circulares, una horizontal y otra horizontal ligeramente móvil.
- Dos manómetros, cada uno de ellos conectado a la manguera de uno de los gatos, cada manómetro tiene un aditamento que señala la presión máxima alcanzada y son de diferente capacidad.
- Un juego de dos micrómetros.

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- a) Primeramente se midió con vernier las dimensiones de cada espécimen.
- b) A las muestras con una altura mayor a 9 cm y no desgranables (o muy suaves) se les colocó el juego de micrómetros, instalados sobre dos anillos metálicos que originalmente tienen una separación fija de 60 mm. A las muestras con una altura menor a los 9 cm no se les colocó los micrómetros, pues las platinas de la prensa no lo permitían; lo mismo sucedió en el caso de las muestras desgranables, ya que al fijar los anillos con sus tornillos, estos dañaban a la muestra.
- c) Se colocó la muestra sobre la platina inferior de la prensa y se subió poco a poco con el gato, hasta que la muestra quedara en contacto con la platina superior. Se observa que hasta este momento el manómetro marca cero. La elección del gato a utilizar dependió de la carga que se requiera, así para una muestra de baja resistencia se usó el gato de 12.5 toneladas con el manómetro de mayor precisión, pero menor capacidad, mientras que para muestras de mayor resistencia se utilizó el gato de 50 toneladas y el manómetro de mayor capacidad.

- d) En el caso de no haberse podido colocar el juego de micrómetros sobre la muestra, se fijaron éstos a la prensa de manera tal que estando perpendiculares a la platina inferior (móvil) pudieran registrar el movimiento de ésta hacia arriba, conforme se aplicaba la carga.
- e) Se aplicó la carga paulatinamente, llevando en un registro la lectura manométrica contra la lectura micrométrica. Este registro (Formato 5.1), donde previamente se anotaron los datos del espécimen, fue de utilidad en el cálculo de parámetros de deformabilidad.
- f) La carga se aplicó lentamente y normalmente cubriendo las siguientes lecturas manométricas: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 22, 26, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75....., hasta la falla. Se hace la aclaración de que los manómetros se retiraron como al 80% de la carga de falla, para evitar que se dañaran al ocurrir la ruptura de la muestra.

Una vez obtenidos los datos de lecturas manométricas y micrométricas se efectuaron los cálculos que proporcionaron la Resistencia a la Compresión Simple y los Módulos de Elasticidad  $E(50)$  y  $E_s(50)$ . Dichos cálculos se efectuaron en el siguiente orden:

- a) Primeramente se multiplicaron cada lectura manométrica registrada por el área del émbolo de la prensa utilizada, anotando el resultado en la columna carga (Formato 5.1) este dato es la fuerza aplicada sobre la muestra; al dividir el dato así obtenido, entre el área de la probeta ensayada se obtuvo el esfuerzo axial soportado por la muestra, este dato se anotó en la columna respectiva. El último dato que se tuvo de esfuerzo axial fue la Resistencia a la Compresión Simple del espécimen.
- b) La cifra anotada en la columna Lectura Micrométrica es la deformación, en micras, del espécimen para cada carga. Sin embargo, normalmente el dato que mayor información proporciona es la Deformación Unitaria Axial (EPSILON) y para obtenerlo se dividió la Lectura Micrométrica entre la distancia que originalmente tenían los anillos de soporte de los micrómetros (Puntos Fijos, Lo) o bien, en caso de no haberse podido instalar, entre la longitud total de la probeta ensayada.
- c) Posteriormente se trazó una gráfica de Esfuerzo Axial contra Deformación Unitaria Axial para cada carga, en el espacio que para tal efecto se encuentra en el Formato 1.1. En dicha gráfica se observó el comportamiento de la deformación del material conforme se aplicaba carga.



- d) Finalmente se calcularon los módulos de deformabilidad que comunmente se utilizan en mecánica de rocas, éstos son el Módulo de Elasticidad Tangente al 50%,  $E(50)$  y el Módulo de Elasticidad Secante al 50%,  $Es(50)$ . Su cálculo es muy sencillo ya que se pudieron obtener de la grafica trazada; el primero de ellos,  $E(50)$ , se define como la pendiente de la curva al 50% del esfuerzo final soportado, para fines prácticos se obtuvo creando un entorno pequeño al punto de la curva que corresponde a la mitad del esfuerzo resistido (50%) y se dividió el incremento del esfuerzo (DELTA Esfuerzo Axial) entre el incremento de la deformación unitaria (DELTA EPSILON); el segundo módulo,  $Es(50)$ , se define como la pendiente de la recta que une al origen de los ejes coordenados con el punto de la curva que corresponde a la mitad del esfuerzo resistido.
- e) Finalmente y sólo para el caso de los especímenes que tenían una relación altura-diámetro menor a 2 se aplicó un factor para corregir su resistencia a la Compresión Simple (Obert, 1946). Dicho factor ( $F_c$ ) es el siguiente:

$$F_c = (0.6 + (1/2L))$$

donde L es la altura del espécimen, e I es la relación altura-diámetro.

### 5.1.1.3 Índice de Carga Puntual.

La prueba consiste en aplicar a especímenes de roca una carga axial puntual sin confinamiento, los cuales no necesitan ser labrados de alguna forma en especial, con tal de que cumplan la condición de que la relación D/L esté en el intervalo 1.0 a 1.4, donde D es la altura de la muestra y L su longitud, o sea que su sección debe ser aproximadamente circular. Este tipo de prueba es interesante pues sus resultados son correlacionables con la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tensión.

En general este tipo de pruebas presentan las siguientes Ventajas:

- Se requiere un gato y una prensa de capacidad reducida, incluso portátiles.
- No requiere que las muestras tengan un labrado especial.
- Pueden efectuarse un número de pruebas a bajo costo.
- Es factible probar muestras frágiles o pequeños fragmentos.
- Por el tamaño de los especímenes se reduce el problema de anisotropía en los materiales.
- Los resultados muestran una menor dispersión.

Sin embargo las pruebas comunes de resistencia a la compresión uniaxial, tienen sobre las pruebas de carga puntual, las siguientes ventajas:

- El procedimiento de prueba esta mejor conocido y evaluado.
- Generalmente ya se tienen una gran variedad de resultados patron para una gran variedad de tipos de roca, y también se tiene una amplia experiencia en el manejo de estos datos.

El equipo utilizado fue el siguiente:

- Un gato hidraulico con capacidad de 12.5 toneladas, conectado a una prensa, cuyo émbolo tiene un área de 17.81 centímetros cuadrados y un par de puntas cónicas de acero templado que forman un ángulo de 30 grados respecto a su eje, las cuales terminan en una semiesfera de 5 mm de radio.
- Un manómetro de precisión conectado al gato, con un aditamento que señala la presión máxima alcanzada.

El procedimiento seguido es el siguiente:

- a) Primeramente se midieron con un vernier las dimensiones de cada espécimen.
- b) Posteriormente se colocó la muestra entre las puntas y se aplicó lentamente carga, hasta que el espécimen fallo.

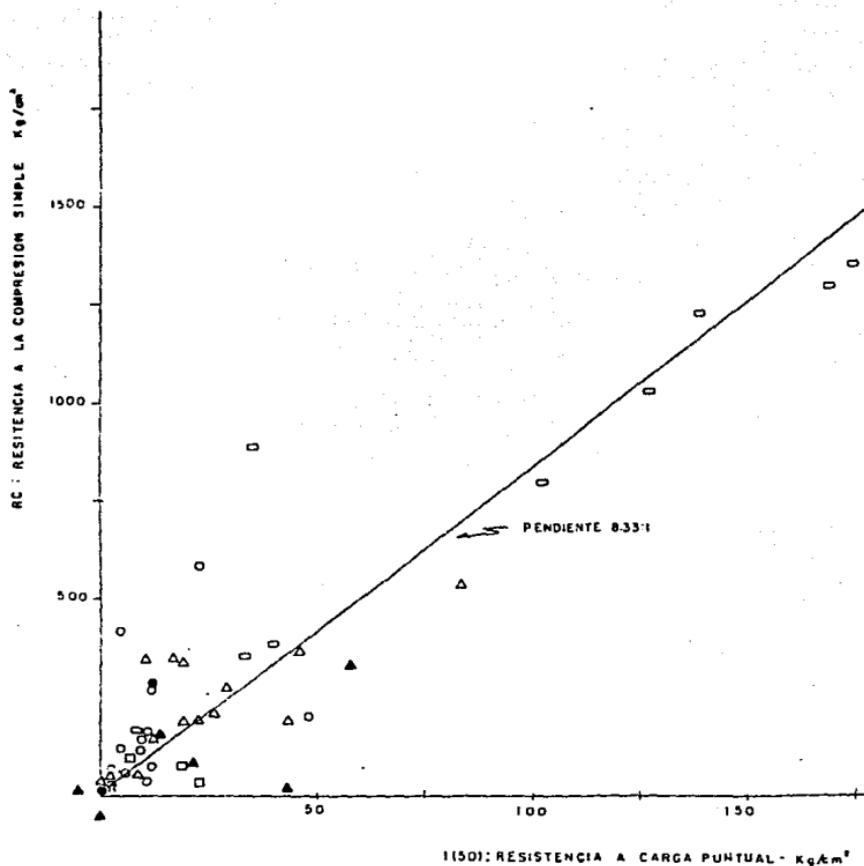
Posteriormente se realizaron los siguientes cálculos:

- a) Primeramente se multiplicó la lectura manométrica registrada en la falla, por el área del émbolo de la prensa utilizada, obteniéndose así la Carga (P).
- b) Posteriormente la Carga (P) se dividió entre la altura del espécimen (D) elevada al cuadrado, o distancia inicial de separación entre las puntas, obteniéndose el Índice de Carga Puntual  $I_s$ .

$$I_s = P / (D^2 \cdot D)$$

A fin de conocer la relación que existe entre la Resistencia a la Compresión Simple ( $R_c$ ) y la Resistencia a la Carga Puntual  $I(50)$  se graficaron los valores obtenidos en muestras colectadas en el Cañón de La Jorda (Figura 5.2), en dicha gráfica se obtuvo una relación de 8.33:1, con puntos muy dispersos. Teóricamente la relación para materiales como cuarcitas y dioritas debe estar del orden de 24:1, para los materiales que nos ocupan aún se está investigando.

# RELACION RC- I(50)



- ▲ PEDERNAL
- ARENISCA - LIMOSA
- TOBAS HIBRIDAS Y ARENISCAS
- ◻ BASALTOS
- △ CALIZAS
- ARENISCA
- ARENISCA PUMITICA DACITICA

FIGURA 5.2

#### 5.1.1.4 Módulos de Elasticidad Dinámicos

Para las pruebas dinámicas de laboratorio se utilizó un equipo sónico de velocidad, el cual permite obtener las velocidades medias de ondas compresionales (p) y transversales (s). Ambas velocidades pueden ser empleadas para calcular las constantes elásticas dinámicas (Módulo de Young y Relación de Poisson).

El equipo sónico de velocidad consiste de las siguientes elementos:

- Un generador de pulso sónico.
- Cabezas pulsoras y sensoras que contienen cristales piezo-eléctricos, que permiten transmitir o recibir el pulso acústico.
- Cables de conexión entre generador, osciloscopio y muestra.
- Un osciloscopio sobre cuya pantalla es medido el tiempo que tardan las ondas acústicas en pasar de la cabeza emisora a la receptora a través de la muestra.

En términos generales, la metodología que se sigue en el cálculo de los módulos elásticos dinámicos es el siguiente:

- 1) Se requiere que las muestras a analizar tengan superficies planas paralelas para que exista un buen contacto entre estas y las cabezas pulsoras y sensoras.
- 2) En función del tipo de cabezas a utilizar son medidos, sobre la pantalla del osciloscopio, los tiempos de arribo de las ondas compresionales (p) o transversales (s).
- 3) Se mide la distancia entre las superficies planas de la muestra, para posteriormente junto con los tiempos de arribo obtenidos en el inciso anterior se midan las velocidades de las ondas p y s.
- 4) Se obtienen, por separado, los pesos específicos y densidades de las muestras de roca para que junto con las velocidades de las ondas transversales (s) y compresionales (p), se calculen los módulos elásticos dinámicos correspondientes.

En este inciso cabe mencionar que el presente método asume que el cálculo de constantes elásticas es realizado en materiales isotrópicos.

El cálculo de los módulos elásticos dinámicos de las diferentes muestras se realiza de acuerdo a las siguientes relaciones matemáticas:

Relación de Poisson

$$RP = \frac{(V_p/V_s) \exp 2 - 2}{2 (V_p/V_s) \exp 2 - 2}$$

Módulo de Rigidez

$$G = D (V_s \exp 2)$$

Módulo de Young

$$E = 2G (1+RP)$$

donde:

D = Densidad

RP = Relación de Poisson

La Figura 5.1 muestra el dispositivo empleado para la medición de módulos elásticos dinámicos.

Como dato adicional se midió el índice de fracturamiento propuesto por Tourenq, Fourmaintraux y Denis (1971), el cual se obtiene de la relación entre las velocidades de transmisión longitudinal y transversal:

$$I_q = V_s/V_p$$

Este índice establece que una roca no microfracturada presenta valores menores de 0.6, para poco microfracturada de 0.6 a 0.7 y para roca muy fracturada índices mayores de 0.7.

### 5.1.2 Resultados

Los resultados de la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de cada una de las rocas se presenta en la Tabla 5.1, en donde se agrupó por unidad geotécnica y por litología y se anotó el número de muestra de campo, la sección geológica y margen donde está ubicado.

Tabla 5.1 Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Intacta.

SECCION Y NÚMERO	MUESTRA	LITOLÓGICA	ZONIFICACION E E D	DEN g/cm <sup>3</sup>	Pc kg/cm <sup>2</sup>	Rca kg/cm <sup>2</sup>	1500 kg/cm <sup>2</sup>	E(50) kg/cm <sup>2</sup> 10 exps	Es(50) kg/cm <sup>2</sup> 10 exps	E din kg/cm <sup>2</sup> 10 exps	σ kg/cm <sup>2</sup> 10 exps	RELACION POISSON	v <sub>s</sub> m/s	v <sub>p</sub> m/s	V <sub>v</sub>
1 1	RD-319	Basalto	I	2.91	392.50	354.05	79.05	4.200	2.600	5.1005	1.9546	0.31	5286.0	2117.6	0.52
1 1	RD-320	Basalto	I	2.74	492.00	392.52	92.00	2.700	3.700	8.4282	3.2453	0.29	4950.0	2449.0	0.52
	RD-321-A	Basalto	I	2.62	1344.80	1215.06	176.00	7.000	7.300	7.8286	2.9706	0.32	5225.5	3360.0	0.51
	RD-321-B	Basalto	I		1241.90										
2 1	RD-320	Basalto	I	2.68	1031.10	919.22	126.00	0.450	0.360	9.8506	2.7725	0.31	7066.0	3750.0	0.52
	RD-351	Basalto	I	2.37	1246.80	1122.87	140.00	7.105	5.605	2.1749	0.6440	0.29	3482.0	1827.2	0.52
	RD-352	Basalto	I	2.67	1210.00	1174.74	170.52	6.400	6.500	6.2650	3.2210	0.29	4700.0	2582.2	0.54
	RD-353	Basalto	I	2.25	357.20	319.27	220.00	1.600	2.000	1.2290	0.4766	0.50	3727.5	1454.7	0.52
	RD-137	Basalto	I	2.76	803.20	718.57	102.43	4.800	5.300	6.1070	2.3340	0.31	5225.0	2907.9	0.53
	RD-77	Basalto	I	2.68	199.90	151.46	9.54								
-----															
1 0	RD-167	Federal	Ila y Ilic	2.09	334.20	297.68	57.86	0.280	0.430	1.4430	0.6273	0.22	2284.4	1725.4	0.51
1 1	RD-211	Federal	Ila y Ilic	2.04	154.20		14.21	1.500	2.720	0.4442	0.2952	0.31	2107.0	1096.0	0.52
5 0	RD-228	Federal	Ila y Ilic	2.25	525.60	471.95		1.010	1.760	3.2390	1.2440	0.21	4411.4	2347.0	0.52
5 0	RD-244	Federal	Ila y Ilic	2.21											
5 0	Bro.2; 30.00	Federal	Ila y Ilic	2.30	156.80	142.03		0.520	0.790	2.0140	0.9670	0.30	2874.0	2051.0	0.52
3 0	RD-97	Caliza	Ila y Ilic	2.40			29.44								
3 0	RD-98	Caliza	Ila y Ilic	2.50	269.33	279.50	46.00	-	-	1.1800	0.4420	0.32	2661.0	1220.7	0.50
2 1	RD-110	Caliza	Ila y Ilic	2.30			10.35								
2 1	RD-114	Caliza	Ila y Ilic	2.31	143.90	128.21	12.59	1.500	1.100	1.7430	0.6610	0.22	2774.2	1691.7	0.51
2 1	RD-116	Caliza	Ila y Ilic	2.32	207.00	184.14	25.62	-	-	0.9900	1.1790	0.25	4964.0	2770.0	0.54
2 1	RD-123-A	Caliza	Ila y Ilic	2.01	540.80		87.23	10.300	5.350	10.2628	1.2800	0.22	2622.9	1276.0	0.51
2 1	RD-123-B	Caliza	Ila y Ilic	2.01	316.20	281.07		-	-	0.2600	0.4180	0.24	1570.0	827.4	0.53
2 0	RD-153	Caliza	Ila y Ilic	2.43			29.89								
5 0	RD-239	Caliza	Ila y Ilic	1.78	51.10	44.87	2.40	-	-	0.4190	0.2250	0.31	2211.5	1150.0	0.52
5 0	RD-240	Caliza	Ila y Ilic	2.27			16.85								
5 0	RD-241-A	Caliza	Ila y Ilic	2.47	429.60	391.81	19.90	2.960	4.260	2.1780	1.6170	0.22	2626.7	1316.7	0.50
5 0	RD-241-B	Caliza	Ila y Ilic	2.47	187.90	167.23	19.90	-	-	0.7190	0.2730	0.31	2026.0	1200.5	
5 0	RD-254	Caliza	Ila y Ilic	2.28	31.80	28.39	14.77	0.050	0.040	2.1720	0.8120	0.53	1700.0	1050.0	0.50
5 0	RD-255	Caliza	Ila y Ilic	2.33	348.00	310.07	20.43	2.200	2.400	3.1280	1.1990	0.20	4254.0	2262.0	0.53
1 0	RD-182	Limos	Ila y Ilic	1.76			4.72								
5 1	Bro.2; 22.70	Limos	Ila y Ilic	2.00	42.00			0.040	0.020	0.2680	0.1122	0.21	1244.0	716.0	0.52
5 1	Bro.2; 26.00	Limos	Ila y Ilic	2.00	27.50			0.020	0.020	0.1260	0.0470	0.24	897.0	495.0	0.48
5 0	RD-179	Armiñaca	Ila y Ilic	2.17	264.70	253.41	12.48	-	-	1.0850	1.1740	0.21	4194.0	2226.0	0.53
1 0	RD-281-C	Armiñaca	Ila y Ilic	1.76	14.30	12.72	0.95	0.020	0.040	0.2610	0.1010	0.20	1402.4	756.0	0.54
5 0	Bro.2; 38.50	Armiñaca	Ila y Ilic	2.00	41.70			0.030	0.060	0.1770	0.0670	0.31	1106.0	567.0	0.52
-----															
5 0	RD-11	Armiñacas	Ila	1.82	25.50	22.72	1.67	0.025	0.217	0.1410	0.0530	0.22	1023.0	540.4	0.51
5 1	RD-19-A	Armiñacas	Ila	1.91	271.50	241.20	12.48	1.500	1.600	2.9200	1.1120	0.31	4622.0	2412.0	0.52
5 1	RD-19-B	Armiñacas	Ila				11.47								
1 1	RD-27	Armiñacas	Ila	2.16	119.80	106.72	9.86	0.310	0.200	1.5950	0.5640	0.23	2222.4	1416.7	0.50
2 1	RD-118	Armiñacas	Ila	2.29	420.50	373.95	8.23	1.400	1.300	0.7020	0.2640	0.22	2048.0	1076.5	0.52
2 1	RD-125-A	Armiñacas	Ila	2.15	38.44	34.24	11.50			1.1020	0.4270	0.31	2256.0	1321.0	0.52

Tabla 5.1 Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Intacta. (Continuación)

SECCION Y MAGEN	MUESTRA	LITOLOGIA	ZONIFICACION E S D	DEN g/cm3	Pc kg/cm2	Pca kg/cm2	1(S0) kg/cm2	E(S0) kg/cm2 10 esp/5	Ea(S0) kg/cm2 10 esp/5	E din kg/cm2 10 esp/5	E kg/cm2 10 esp/5	RELACION POISSON	Vp m/s	Vs m/s	10	
2 I	MC-130	Americas	I Ib	2.45	142.24	126.45	10.05			1.2040	0.4590	0.31	2633.0	1373.9	0.51	
2 I	MC-132	Americas	I Ib	2.00			10.62									
2 I	MC-150	Americas	I Ib	1.94			1.89									
5 D	MC-219	Americas	I Ib	2.66			5.94									
5 D	MC-220	Americas	I Ib	1.92	25.50	22.95	3.25	0.010	0.010	0.2370	0.0973	0.32	1390.7	711.9	0.51	
5 D	MC-221	Americas	I Ib	2.12	120.90	108.34	5.28	0.290	0.660	0.8760	0.3410	0.31	2435.5	1242.0	0.52	
5 D	MC-248	Americas	I Ib	2.19	83.70	74.56	12.64	0.200	0.220	0.3040	0.1170	0.25	1366.8	730.0	0.53	
5 D	MC-250-A	Americas	I Ib	2.26	146.50	148.29	11.67	0.840	0.740	2.1460	0.8240	0.30	3371.4	1923.1	0.54	
5 D	MC-250-B	Americas	I Ib	2.24	124.00	113.05		0.240	0.200	1.0610	0.3960	0.33	2654.3	1327.1	0.50	
4 D	MC-271	Americas	I Ib	1.86	56.60	53.74	4.70			0.3030	0.1140	0.33	1554.0	792.0	0.50	
4 D	MC-277	Americas	I Ib	2.29			2.58									
4 D	MC-281-A	Americas	I Ib	2.18	589.10		23.22	0.500	0.200	1.5250	0.5770	0.32	2162.9	1677.9	0.51	
4 D	MC-281-B	Americas	I Ib				28.42									
4 D	MC-286	Americas	I Ib	1.83			4.16									
1 I	MC-301	Americas	I Ib	1.90	68.40	61.37	3.15	0.040	0.060	0.5040	0.1950	0.30	1880.0	1012.0	0.54	
1 I	MC-314	Americas	I Ib	1.58			1.57			0.1820	0.0690	0.32	1287.5	660.1	0.51	
5 I	Pro. 1: 11.25	Americas	I Ib	2.00	31.40					0.8750	0.3490	0.29	2285.0	1304.0	0.54	
5 D	Inc. 2: 42.50	Americas	I Ib	2.00	32.60	47.68		0.070	0.050	0.4900	0.1670	0.21	1844.0	937.0	0.52	
5 D	Pro. 2: 42.50	Americas	I Ib	2.00	61.70			0.080	1.090	0.2670	0.1080	0.36	1604.0	737.0	0.46	
5 D	Pro. 3: 50.30	Americas	I Ib	2.00	62.30	37.26				0.3120	0.1130	0.38	1745.0	751.0	0.42	
5 D	Pro. 4: 55.00	Americas	I Ib	2.00	44.60	40.29		0.080	0.050	0.2200	0.0925	0.36	1475.0	690.0	0.46	
5 D	Pro. 5: 60.50	Americas	I Ib	2.00	29.20	26.47				0.4410	0.1560	0.33	1682.0	911.0	0.50	
5 D	Pro. 6: 65.70	Americas	I Ib	2.00	61.80			0.080	0.060	0.3350	0.2100	0.32	2008.0	1024.0	0.51	
5 D	Pro. 7: 70.50	Americas	I Ib	2.00	563.00			0.520	0.440	2.1750	0.7990	0.34	4363.0	1998.0	0.46	
1 D	MC-186	Llano Aren.	I Ib	2.04	75.30		18.29	0.700	0.800	1.0930	0.4200	0.30	2677.5	1428.0	0.53	
1 D	MC-188	Llano Aren.	I Ib	1.95												
1 D	MC-170	Llano Aren.	I Ib	2.05			8.87									
1 D	MC-175	Llano Aren.	I Ib	2.12	93.10		7.61	0.190	0.690	1.0640	0.4080	0.30	2648.8	1384.8	0.53	
1 D	MC-176	Llano Aren.	I Ib	2.12	25.90	31.95	23.23	0.750	1.000	1.0820	0.4120	0.31	2662.9	1591.0	0.52	
5 I	MC-17	Federal	I Ib	2.37	81.00	72.09	21.22	0.250	0.290	4.4510	1.7080	0.30	5032.0	2684.3	0.53	
1 D	MC-177	Federal	I Ib	2.09	43.80	38.17	12.70	0.370	0.200	2.9390	1.1150	0.32	4466.7	2310.3	0.52	
5 I	MC-216	Federal	I Ib	2.33	222.80	198.28		no	2.260	1.630	2.0830	0.7700	0.31	3544.5	1811.7	0.52
4 I	MC-263	Federal	I Ib	1.73				no								
5 I	Pro. 1: 9.00	Federal	I Ib	2.30	21.90			0.030	0.020	5.8110	2.2950	0.27	5628.0	3152.0	0.56	
5 I	MC-25	Caliza	I Ib	2.34	109.20	96.85	no	0.320	0.120	2.7780	1.0660	0.30	4060.0	2125.0	0.53	
5 I	MC-21	Caliza	I Ib	2.50	342.20	305.18	17.46			1.9370	0.7380	0.31	3281.8	1719.0	0.52	
5 I	MC-28	Caliza	I Ib	2.15	104.70	94.96	9.44	1.360	1.420	1.2070	0.4500	0.34	2940.0	1473.0	0.52	
4 I	MC-71	Caliza	I Ib	2.08	192.50	171.54	41.65			2.3620	0.8950	0.32	4145.0	2072.5	0.54	
2 I	MC-125-B	Caliza	I Ib	1.98			2.27									
1 D	MC-125-A	Caliza	I Ib	2.30	189.70	170.65	22.33	0.420	0.320	2.0780	0.7970	0.30	2907.7	1561.2	0.54	
1 D	MC-173-A	Caliza	I Ib	1.98			16.62									
1 D	MC-173-B	Caliza	I Ib	2.29	204.50	181.51	46.72	2.200	8.600	3.9560	1.3540	0.21	4562.5	2380.4	0.52	
5 D	MC-218	Caliza	I Ib	2.39			76.56									
4 D	MC-278	Caliza	I Ib	1.20	51.50		9.14	0.240	0.350	1.0780	0.4230	0.34	2728.0	1322.9	0.49	
1 I	MC-305	Caliza	I Ib	2.24	282.80	237.25	29.54			1.1740	0.4470	0.31	2712.0	1412.5	0.52	

Tabla 5.1: Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Intacta. (Continuación).

SECCION Y NOMBRE	MUESTRA	LITOLOGIA	IDENTIFICACION S G D	DEN g/cm <sup>3</sup>	Rc kg/cm <sup>2</sup>	Rca kg/cm <sup>2</sup>	1(S) kg/cm <sup>2</sup>	E(50) kg/cm <sup>2</sup> 10 exp <sup>5</sup>	E(50) kg/cm <sup>2</sup> 10 exp <sup>5</sup>	E din kg/cm <sup>2</sup> 10 exp <sup>5</sup>	ν kg/cm <sup>2</sup> 10 exp <sup>5</sup>	RELACION POISSON	Vp m/s	Vs m/s	IQ
5 1	MS-41	Aren. Pua.	11d	1.82			11.17								
3 1	MS-89	Aren. Pua.	11d	1.99			4.36								
2 1	MS-125	Aren. Pua.	11d	1.83			no								
1 0	MS-162	Aren. Pua.	11d	1.70	61.20	53.93		0.120	0.080	0.3970	0.1490	0.33	1871.0	923.7	0.50
5 0	MS-257	Aren. Pua.	11d	1.95	15.20	13.81	1.84	0.010	0.010	0.1960	0.0740	0.32	1203.0	616.4	0.51
-----															
1 1	MS-203	Aren. Pua.	111	1.73	24.40	21.76	3.60	0.050	0.040	0.1650	0.0630	0.32	1173.9	600.0	0.51
1 1	MS-200	Aren. Pua.	111	1.74			2.07								
1 0	MS-162	Aren. Pua.	111	1.72	13.20	11.87	1.61	0.020	0.010	0.5400	0.2060	0.31	2075.0	1092.0	0.53
1 0	MS-165	Aren. Pua.	111	2.05			8.70								
2 1	MS-139	Aren. Pua.	111	1.89	47.10	41.92				1.1230	0.4250	0.33	3001.0	1500.0	0.50
2 1	MS-146	Aren. Pua.	111	1.66			0.61			0.0460	0.0170	0.32	625.0	322.6	0.52
2 1	MS-258	Aren. Pua.	111	1.69			no								
2 1	MS-234	Aren. Pua.	111	1.76	29.36		3.43	0.040	0.020	0.2660	0.1220	0.30	1428.6	761.9	0.53
2 0	MS-144	Aren. Pua.	111	1.69	34.20		2.54	0.640	0.030	0.4740	0.1810	0.31	1966.7	1025.0	0.52
3 1	MS-63	Aren. Pua.	111	1.82	11.50	10.22	1.03	0.017	0.019	0.0680	0.0250	0.32	733.6	375.3	0.51
3 1	MS-85	Aren. Pua.	111	1.67	25.00	21.81	2.50	0.050	0.100	0.1410	0.0540	0.32	1094.1	567.0	0.52
3 0	MS-91	Aren. Pua.	111	1.66			no								
3 0	MS-92	Aren. Pua.	111	1.61	10.60	9.27	no	0.011	0.008	0.0651	0.0254	0.33	774.3	390.0	0.50
4 1	MS-60	Aren. Pua.	111	1.72	17.60		2.30	0.030	0.028	0.1690	0.0650	0.31	1165.0	613.2	0.53
4 1	MS-62	Aren. Pua.	111	1.81	27.10	24.28	1.95	0.040	0.020	0.1970	0.0494	0.33	945.0	472.5	0.50
4 0	MS-262	Aren. Pua.	111	1.76			no								
4 0	MS-267	Aren. Pua.	111	1.82	35.30		no	0.060	0.050	0.1450	0.0250	0.32	1075.8	549.5	0.51
4 0	MS-269	Aren. Pua.	111	1.82	14.90		2.29	0.020	0.020	0.2540	0.0970	0.31	1286.5	730.2	0.53
1 0	MS-270	Aren. Pua.	111	2.10											
5 1	MS-4	Aren. Pua.	111	1.80			no								
5 1	MS-7	Aren. Pua.	111	1.68			no								
5 0	MS-212-9	Aren. Pua.	111	1.75			6.29								
5 0	MS-213-6	Aren. Pua.	111	1.75			7.01								
5 0	MS-214	Aren. Pua.	111	1.76	30.50	21.50	1.29	0.080	0.040	0.185	0.0690	0.33	1256.2	628.1	0.50
5 0	MS-232	Aren. Pua.	111	1.68	19.90	16.77	3.45	0.030	0.020	0.214	0.0823	0.30	1246.7	700.0	0.54
5 0	MS-222	Aren. Pua.	111	1.81	59.10		4.67	0.120	0.100	0.387	0.1460	0.30	1701.5	907.5	0.53
5 0	MS-226	Aren. Pua.	111	1.61	7.50		1.31	0.020	0.010	0.165	0.0630	0.30	1175.0	626.7	0.53

Tabla 5.1 Resultados de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Pesca Intacta. (Continuación).

SECCION Y MUSEO	MUESTRA	LITOLOGIA	IDENTIFICACION B E G	DEN g/cm <sup>3</sup>	fc kg/cm <sup>2</sup>	Rca kg/cm <sup>2</sup>	I(50) kg/cm <sup>2</sup>	E(50) kg/cm <sup>2</sup>	Es(50) kg/cm <sup>2</sup>	E din kg/cm <sup>2</sup>	E kg/cm <sup>2</sup>	VELOCIDAD FOFISON m/s	Vp m/s	Vs m/s	Ic
5 1	Ino.1; 17.00	Aren.Pus.	III	2.00*	106.80			0.230	0.179	2.562	0.949*	0.22	4295.0	2202.0	0.51
5 1	Ino.1; 20.50	Aren.Pus.	III	2.00*	46.43	12.02		0.266	0.640	0.186	0.0725	0.22	1152.0	254.0	0.51
5 1	Ino.1; 21.00	Aren.Pus.	III	2.00*	26.60			0.050	0.050	0.194	0.0737	0.22	1177.0	607.0	0.51
5 1	Ino.1; 40.00	Aren.Pus.	III	2.00*	22.30	20.25		0.050	0.060	0.262	0.1290	0.27	1632.0	826.0	0.45
5 1	Ino.1; 50.00	Aren.Pus.	III	2.00*	20.30			0.060	0.070	0.238	0.2611	0.21	1294.0	875.0	0.22
5 1	Ino.1; 50.70	Aren.Pus.	III	2.00*	17.70	16.96		0.042	0.068	0.265	0.1243	0.26	1755.0	95.0	0.44
5 1	Ino.1; 62.00	Aren.Pus.	III	2.00*	29.80			0.100	0.125	0.411	0.1250	0.27	1728.0	980.0	0.50
5 1	Ino.1; 70.00	Aren.Pus.	III	2.00*	22.80			0.020	0.250	0.121	0.0480	0.22	1675.0	492.0	0.47
5 1	Ino.1; 80.00	Aren.Pus.	III	2.00*	12.70			0.020	0.030	0.181	0.0670	0.22	1219.0	579.0	0.47
5 1	Ino.1; 80.50	Aren.Pus.	III	2.00	10.50			0.020	0.020	0.275	0.1425	0.21	1615.0	847.0	0.52
5 1	Ino.1; 100.00	Aren.Pus.	III	2.00*	22.00	17.70		0.050	0.040	0.297	0.1161	0.25	1262.0	711.0	0.52
5 1	Ino.1; 20.00	Aren.Pus.	III	2.00*	32.3*			0.037	0.027	0.223	0.0296	0.29	1250.0	671.0	0.52
5 1	Ino.1; 99.00	Aren.Pus.	III	2.00*	37.10			0.061*	0.040	0.246	0.1201	0.25	1476.0	624.0	0.52
5 1	Ino.1; 60.00	Aren.Pus.	III	2.00*	28.60	25.97		0.069	0.050	0.421	0.1510	0.22	1463.0	127.0	0.52
5 1	Ino.1; 71.00	Aren.Pus.	III	2.00*	27.00			0.055	0.027	0.297	0.0500	0.24	1376.0	679.0	0.50
5 1	Ino.1; 91.00	Aren.Pus.	III	2.00*	16.40			0.018	0.020	0.246	0.0270	0.22	1220.0	126.0	0.50
5 0	Ino.2; 71.50	Aren.Pus.	III	2.00*	84.80			0.230	0.189*	0.751	0.2790	0.24	2411.0	1825.0	0.47
5 0	Ino.2; 76.00	Aren.Pus.	III	2.00*	35.00			0.100	0.090	0.256	0.1060	0.22	1472.0	736.0	0.50
5 0	Ino.2; 80.50	Aren.Pus.	III	2.00*	32.40			0.086	0.075	0.224	0.1250	0.22	1561.0	294.0	0.51
5 0	Ino.2; 84.80	Aren.Pus.	III	2.00*	25.00			0.090	0.090	0.215	0.1170	0.24	1572.0	786.0	0.45
5 0	Ino.2; 90.00	Aren.Pus.	III	2.00*	10.70			0.050	0.030	0.345	0.2470	0.20	2101.0	1112.0	0.52
5 0	Ino.2; 95.00	Aren.Pus.	III	2.00*	32.20			0.070	0.040	0.342	0.1590	0.21	1530.0	936.0	0.52

\* Estimado

DEN = Densidad.

Rc = Resistencia a la compresión simple obtenida.

Rca = Resistencia a la compresión simple ajustada por efecto de escala.

I(50) = Índice de carga puntual.

E(50) = Módulo de elasticidad al 50% de la carga de rotura.

Es(50) = Módulo de elasticidad secante al 50% de la carga de rotura.

E din = Módulo de elasticidad dinámico.

E = Módulo de rigidez.

Vp = Velocidad de transmisión de ondas primarias.

Vs = Velocidad de transmisión de ondas secundarias.

Ic = Índice de fracturamiento.

Dada la gran cantidad de datos reunidos en la Tabla 5.1, se procedió a efectuar un análisis estadístico de cada una de las propiedades por unidades litológicas; los resultados se presentan en las Tablas 5.2 y 5.3.

Tabla 5.2 Promedios, Coeficiente de Variación y Rangos de Propiedades Físicas y Mecánicas

UNIDAD O SUBUNIDAD	LITOLÓGICA	DEM g/cm <sup>3</sup>	Rc kg/cm <sup>2</sup>	I(50) kg/cm <sup>2</sup>	E(50) kg/cm <sup>2</sup> x 10exp5
I	Basalto	2.46	837.9	92.74	4.42
		2.01-2.75	160-1365	9.54-176	0.45-7.10
II d	Arenisca Pumítica Dacítica	1.86	38.2	5.79	0.065
		1.70-1.99	15.2-61.2	1.84-11.17	0.01-0.12
	Pedernal	2.2	293.7	36.03	0.83
		2.04-2.31	154.2-529.6	14.21-57.86	0.28-1.50
IIa-IIc	Caliza	2.29	263.5	27.87	3.47
		1.78-2.5	31.8-540.8	2.40-93.23	1.50-10.0
	Limos	1.92	35.6	-	0.035
		1.76-2.00	27.5-43.6	-	0.03-0.04
	Arenisca	1.97	113.6	6.73	0.045
		1.76-2.17	14.5-284.7	0.98-12.48	0.02-0.07
	Areniscas y Tabas Híbridas	2.059	144.6	9.01	0.43
		1.53-2.43	25.5-589.1	1.57-28.42	0.01-1.50
	Limos arenosos (lodolitas)	2.072	68.1	14.76	0.614
		1.99-2.13	35.9-93.1	8.83-23.33	0.39-0.75
II b	Pedernal	2.164	92.4	17.91	0.75
		1.73-2.37	43.8-222.8	12.70-21.32	0.25-2.36
	Caliza	2.26	189.4	27.9	1.85
		1.98-2.50	51.5-342.2	2.37-79.56	0.24-7.20
III	Arenisca	1.77	25.4	3.16	0.04
		1.61-2.10	7.5-59.1	0.61-7.01	0.01-0.12

Explicación:

Media: 2.164

Rango de la propiedad: 1.73-2.37

Tabla 5.3 Promedios, y Rangos de Propiedades Físicas y Mecánicas

UNIDAD O SUBUNIDAD	LITOLOGÍA	E <sub>di</sub> kg/cm <sup>2</sup> x 10exp5	β kg/cm <sup>2</sup> x 10exp5	REL. POISSON I	V <sub>p</sub> m/s	V <sub>s</sub> m/s	I <sub>q</sub>
I	Basalto	6.14	2.35	0.3	5545.5	2539	0.53
		1.24-9.85	0.476-3.773	0.29-0.32	2728-7088	3752-1455	0.51-0.55
IIa	Arenisca Puzolítica	0.29	0.11	0.375	1537	776	0.51
		0.19-0.39	0.07-0.19	0.32-0.33	1203-1871	616-936	0.50-0.51
IIa-IIc	Federal	2.01	0.77	0.31	3445	1805	0.52
		0.64-3.25	0.245-1.24	0.30-0.32	2107-4471	1096-2348	0.51-0.53
	Caliza	2.62	0.654	0.316	3064	1594	0.52
		0.36-10.05	0.138-1.578	0.30-0.33	1572-4906	827-2575	0.50-0.54
Limos	0.19	0.74	0.325	1181	601	0.50	
	0.126-0.268	0.047-0.102	0.31-0.34	997-1564	485-716	0.49-0.52	
Arenisca	1.16	0.44	0.306	2301	1222	0.53	
	0.177-3.665	0.067-1.174	0.30-0.31	1106-4394	582-2324	0.52-0.54	
Areniscas y Tofas Híbridas	0.68	0.33	0.330	2290	1164	0.51	
	0.141-2.920	0.05-1.112	0.28-0.38	1053-4625	540-2413	0.42-0.54	
Limos arenosos (lodolitas)	1.08	0.413	0.303	2648	1401	0.53	
	1.064-1.073	0.408-0.42	0.30-0.31	2605-2678	1325-1428	0.52-0.53	
IIb	Federal	3.821	1.47	0.30	4678	2497	0.53
		2.063-5.811	0.790-2.295	0.27-0.32	3565-5628	1942-3152	0.52-0.56
	Caliza	2.02	0.77	0.32	3486	1800	0.51
1.078-3.356		0.403-1.354	0.30-0.34	2940-4563	1413-2360	0.49-0.53	
III	Arenisca	0.286	0.101	0.31	1346	698	0.52
	Puzolítica	0.046-1.13	0.017-0.22	0.39-0.33	625-3000	375-1500	0.50-0.54

Explicación:

Medias: 2.164

Rango de la propiedad: 1.73-2.37

## 5.2 ZONIFICACION GEOTECNICA

Para poder realizar la zonificación geotécnica de las unidades de roca del cañon, se utilizaron los lineamientos establecidos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1979) de acuerdo con el documento de "Descripción Geotécnica Básica (BGD)", cuyo objetivo esencial es caracterizar el comportamiento mecánico de masas rocosas, para lo cual toma en cuenta los siguientes parámetros:

- El nombre de la roca, con una descripción geológica simplificada.
- Dos rasgos estructurales de la masa rocosa, el espesor de las capas y el espaciamiento de las fracturas.
- Dos características mecánicas, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta y el ángulo de fricción entre las fracturas.
- Grado de intemperismo de las masas de roca.

El nombre de la roca y la descripción geológica son de gran interés debido a la abundante información mecánica que de ellas se obtiene.

Los parámetros de espesor de capas y espaciamiento de fracturas se consideran importantes, puesto que implican aspectos morfológicos básicos para la visualización de la masa rocosa, ya que normalmente tienen una influencia considerable en el comportamiento mecánico de las masas rocosas y su evaluación cuantitativa es sencilla.

Los parámetros de resistencia de la roca y el ángulo de fricción de las fracturas se incluyen por jugar un papel muy importante en el comportamiento mecánico de los macizos rocosos; como regla general, de sus valores se pueden inferir otras características mecánicas; además de que pueden ser evaluados por pruebas sencillas o inferidos de la experiencia del observador.

Los límites del intervalo de los cuatro parámetros fue seleccionado, dentro de lo posible, para que correspondieran con las fronteras de importancia en los proyectos de ingeniería.

El método de trabajo que se siguió para la zonificación fue el siguiente:

- Durante los trabajos del levantamiento geológico de la zona del Cañon y de la medición de las columnas estratigráficas, se llevó a cabo, simultáneamente, la descripción de los parámetros del BGD en las unidades litológicas.

- Posteriormente, se realizó un procesamiento de los datos medidos en campo y se realizaron pruebas de laboratorio a algunas muestras de roca para obtener la resistencia a la compresión simple y otras propiedades mecánicas.
- Una vez reunida la información anterior, se procedió a interpretarla y definir las zonas geotécnicas, y asignarles los intervalos en donde se ubican cada propiedad. Estos rangos fueron subdivididos para mostrar la información más completa, ya que algunos parámetros variaban mucho por la intercalación de materiales con diferentes propiedades.

## RESULTADOS

Como resultado de la zonificación por el método BGD en la zona del Cañón, se diferenciaron 6 unidades geotécnicas, siendo el factor litológico el que mayor influencia tuvo en la subdivisión, la nomenclatura utilizada fue la misma que la que se empleó en la zonificación geológica-estratigráfica, a fin de no complicar dicha nomenclatura.

Las seis unidades geotécnicas y sus parámetros descriptivos se presentan en la Tabla 5.4.

A continuación se menciona la forma como se obtuvo cada parámetro y las consideraciones efectuadas en la clasificación:

La descripción geológica simplificada se realizó en campo y considera los aspectos básicos requeridos por el BGD, como son el nombre genético, la estructura geológica del macizo rocoso; el fracturamiento y sus características, el color, textura y composición mineral de los materiales rocosos y el grado de intemperismo. Esta información se presenta completa en el capítulo 4.1, en donde cada unidad litológica es descrita estratigráfica y geotécnicamente. En la Tabla 5.4 se incluye un resumen de los tipos de roca y a continuación se presenta una descripción más amplia con los parámetros antes mencionados:

I.- Andesita gris, textura afanítica; fracturada con 2 sistemas principales continuos de amplio espaciamiento y otro sistema secundario subhorizontal (lajeamiento); roca dura, compacta y ligeramente intemperizada.

II.- Arenisca Pumítica Andesítica, color gris verdoso; con estratificación laminar (2-5 cm) y graduación normal; con dos sistemas de fracturas principales, subcontinuas, de espaciamiento moderado; roca compacta, la dureza media a muy baja, con ligero intemperismo.

## ZONIFICACION GEOTECNICA SEGUN BGD

UNIDAD GEOLOGICA	UNIDAD GEOTECNICA	TIPO DE ROCA	ESPESOR DE LAS CAPAS	ESPACIAMIENTO DE FRACTURAS	RESISTENCIA A LA COMPRESION	SIMBOLO BGD		
U <sub>I</sub>	U <sub>I</sub>	ANDESITA	MODERADO (L3)	AMPLIO (F2)	ALTA (S2)	L3, F2, S2		
U <sub>II</sub>	U <sub>II d</sub>	ARENISCA PUMITICA LAMINAR	MUY PEQUEÑO (L5)	MUY AMPLIO (F1)	FRACTURAS MAYORES MODERADO (F3)	FRACTURAS MENORES MUY BAJA (S4)	L5, F1-13, S4	
	U <sub>II b</sub>	INTERCALACION DE ARENISCAS, ARENISCAS CONGLOMERATICAS CON PEDERNAL, CALIZAS Y LIMOS ARENOSOS.	ARENISCA MODERADO (L3)		FRACTURAS MENORES MODERADO A AMPLIO (F2-3)	FRACTURAS MAYORES BAJA (S4)	LIMOS ARENOSOS MUY BAJA (S5)	L3-L4, F2-1-3, S4-S5
	U <sub>II a-c</sub>	INTERCALACION DE LIMOS, ARCILLAS CON PEDERNAL Y CALIZAS.	PEQUEÑO A MODERADO (L3-4)		FRACTURAS MAYORES MODERADO A AMPLIO (F2-3)	FRACTURAS MENORES PEDERNAL Y CALIZAS MODERADO (S3)	LIMO Y ARCILLA MUY BAJA (S5)	L3-4, F1-1-3, S3-S5
U <sub>III</sub>	U <sub>III</sub>	ARENISCA PUMITICA MASIVA	MASIVO (L0)	MUY AMPLIO (F1)	MUY BAJA (S5)	L0, F1, S5		

T A B L A 5 . 4

I Ib.- Intercalación de areniscas, areniscas conglomeráticas, bien compactas y cementadas, con un ligero a moderado intemperismo; y en menor cantidad pedernales y calizas compactos, de baja dureza y ligero intemperismo; así como horizontes de limos arenosos.

I Ia-c.- Intercalación de rocas blandas (limos y arcillas) con rocas compactas (pedernal y calizas), las primeras se encuentran formadas por mezcla de minerales arcillosos (montmorilonita e illita), su consistencia es moderada, de muy baja dureza y están muy intemperizadas. Las rocas compactas presentan una dureza moderada y un ligero intemperismo en las calizas.

III.- Arenisca Fumítica color de pardo a gris, textura arenosa de grano fino (60-70%), con matriz limosa (28-35%), sin cementante; estructura masiva y muy escasas fracturas; la roca está compacta, aunque su resistencia es muy baja; presenta un intemperismo moderado.

El siguiente cuadro muestra los intervalos de los valores que se utilizaron en la Tabla 5.4:

INTERVALOS	ESPESOR (cm)	ESPACIAMIENTO (cm)	RESISTENCIA (Mpa)
200	L1	F1	S1
60 - 200	L2	F2	S2
20 - 60	L3	F3	S3
6 - 20	L4	F4	S4
6	L5	F5	S5

El espesor de las capas se obtuvo de las mediciones de campo y fue uno de los parámetros clave en la subdivisión de unidades, ya que la mayoría de ellas mostraron variaciones notables en el espesor de las capas de roca; variando desde capas de espesores muy pequeños (Unidad IId) hasta paquetes masivos (Unidad III).

El espaciamiento de fracturas se obtuvo de la medición estadística de los sistemas de fracturas. En la Unidad II se tuvo que hacer una diferenciación, ya que la masa rocosa en conjunto presenta pocas fracturas, con amplios espaciamientos; sin embargo, las rocas compactas (pedernales, calizas y areniscas) tienen fracturas pequeñas y de poca continuidad, es decir, no atraviesan a los materiales blandos, y su espaciamiento varía de moderado a amplio.

En cuanto a la resistencia, fue obtenida de pruebas de laboratorio de resistencia a la compresión simple en muestras superficiales; únicamente el basalto presentó valores de resistencia alta; las unidades litológicas (II y III) dieron valores muy bajos en las areniscas pumíticas de las unidades II d y III, así como en las arcillas y limos (IIa-c-b); mientras que las areniscas, calizas y pedernales son de baja resistencia.

El ángulo de fricción de las fracturas no se tomó en consideración para esta zonificación, ya que no se realizaron pruebas de laboratorio para obtener esta propiedad y dada la escasez de fracturas mayores, no se considero representativo este parámetro.

#### - Zonificación a lo largo del Cañón.

Las unidades geotécnicas definidas tienen prácticamente las mismas características geológico-geotécnicas a lo largo del Cañón de La Zurda, ya que el espesor de las capas, espaciamento de las fracturas, resistencia y grado de intemperismo es muy similar en todos los sitios. Sin embargo, si se presentan diferencias en la presencia o ausencia de ciertas unidades litológicas importantes geotécnicamente, así como variaciones en su litología o el espesor de las unidades, o bien por la evidencia de zonas inestables.

En base a lo anterior, se considera que el Cañón puede dividirse en cuatro zonas geotécnicas, que se muestran en la Figura 5.3 y son las siguientes:

- ZONA EJE 1
- ZONA EJES 2 Y 3
- ZONA EJE 4
- ZONA EJE 5

La Tabla 5.5 resume las unidades litológicas que se presentan en cada zona, así como su espesor y características geológico-geotécnicas que las distinguen.

La distribución gráfica puede observarse en el plano de secciones de los ejes (Plano 4.2).



Tabla 5.5 Zonificación Geotécnica del Cañón de La Zurda entre los Ejes 1 y 5.

ZONA	UNIDADES GEOTÉCNICAS PRESENTES	ESPESOR PROMEDIO (m)	OBSERVACIONES
Eje 1	UIId	7	En esta zona no afloran las andesitas de la Unidad I.
	UIIc	16	
	UIIb	15	
	UIIa	12	
	UIII	más de 100	
Ejes 2 y 3	UI	35-40	Esta zona se distingue por aflorar las andesitas en ambas márgenes. El espesor de la Unidad II es más reducido. La margen derecha del eje 2 presenta en su porción inferior un espesor de 15 m de depósitos de talud.
	UIId	10	
	UIIc	10	
	UIIb	14	
	UIIa	15	
UIII	más de 100		
Eje 4	UIId	6	No afloran las andesitas en la parte superior. La margen izquierda muestra evidencias de antiguos deslizamientos de roca. En la margen derecha tiene una mayor pendiente y la Unidad IIB tienen una variación en su litología; volviéndose predominantemente una arenisca conglomerática más compacta y sin pedernal y calizas.
	UIIc	24	
	UIIb y b1	40	
	UIIa	10	
	UIII	más de 100	
Eje 5	UIId	8	Tampoco afloran las andesitas, ni la Unidad Arcillosa UIIa y aumenta notablemente el espesor de la Unidad UIIb1 y sigue siendo conglomerática en su margen derecha.
	UIIc	24 y 10 (M.D.)	
	UIIb y b2	40 y 35 (M.D.)	
	UIII	más de 100	

### 5.3 CLASIFICACION INGENIERIL DE LAS ROCAS

La clasificación ingenieril que se utilizó en este proyecto fue la establecida por Deere y Miller (1966), que es una de las más reconocidas para clasificar a la roca "intacta"; es decir, la roca de la cual pueden tomarse muestras para su ensayo en laboratorio, no presentando características estructurales de gran escala como planos de estratificación, fracturas y fallas.

Esta clasificación se basa en dos propiedades importantes de la roca: La resistencia a la compresión simple y el módulo de elasticidad.

El módulo empleado es el módulo tangente correspondiente a un nivel tensional igual a la mitad de la resistencia de la roca. Ambas pruebas fueron realizadas a las muestras colectadas en superficie, en la zona del Cañón de La Zurda.

De acuerdo con su resistencia a la compresión, la roca se clasifica en cinco categorías:

CLASE	DESCRIPCION	RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE (kg/cm <sup>2</sup> )
A	Resistencia muy alta	mayor a 2,250
B	Resistencia alta	1,120 - 2,250
C	Resistencia media	560 - 1,120
C	Resistencia baja	280 - 560
D	Resistencia muy baja	menor a 280

El segundo elemento del sistema de clasificación es el módulo de elasticidad (Eso). sin embargo, en lugar de emplear el módulo propiamente dicho se utiliza la relación entre módulo y resistencia a la compresión simple, denominado módulo relativo.

Para agrupar los resultados e interpretar la información se utilizó la gráfica con los valores de resistencia a la compresión simple y módulo de elasticidad, en escala logarítmica, para abarcar una amplia gama de valores. Las categorías de resistencia se indican en la parte superior de la figura y el módulo relativo se deduce de la posición respecto a las diagonales. La zona central viene limitada por una línea superior con un módulo relativo de 500:1 y una línea inferior correspondiente a un módulo 200:1.

La clasificación basada en el módulo se resume en el siguiente cuadro:

CLASE	DESCRIPCION	MÓDULO RELATIVO
H	Módulo relativo elevado	mayor a 500
M	Módulo relativo medio	200 - 500
L	Módulo relativo bajo	menor a 200

Por lo tanto, las rocas se clasifican con su descripción litológica más su resistencia y módulo relativo.

### - RESULTADOS

Las clasificaciones ingenieriles se realizaron por unidad geotécnica y para cada roca que compone la unidad. Elaborando para tal efecto las gráficas de las Figuras 5.4.1 a 5.4.6.

La Tabla 5.6 resume los valores de resistencia y módulos relativos de cada litología.

Tabla 5.6 Resumen de la Clasificación de la Roca Intacta.

UNIDAD	LITOLOGIA	RESISTENCIA	MÓDULO RELATIVO
I	Basalto	media a alta	medio a alto
II d	Arenisca Pumitica	muy baja	bajo (1)
II b	Pedernal	muy baja	medio a alto (2)
	Caliza	muy baja	medio a alto
	Areniscas	muy baja a alta	bajo a medio
VII a y c	Limos	muy baja	bajo
	Pedernal	baja a muy baja	bajo a alto (1)
	Calizas	baja	alto
UIII (Superficie)	Arenisca Pumitica	muy baja	bajo (3)
UII (Barrenos)	Arenisca Pumitica	muy baja	medio (3)

- 1) Pocos valores.
- 2) Pocos valores y amplia dispersión.
- 3) En el límite.

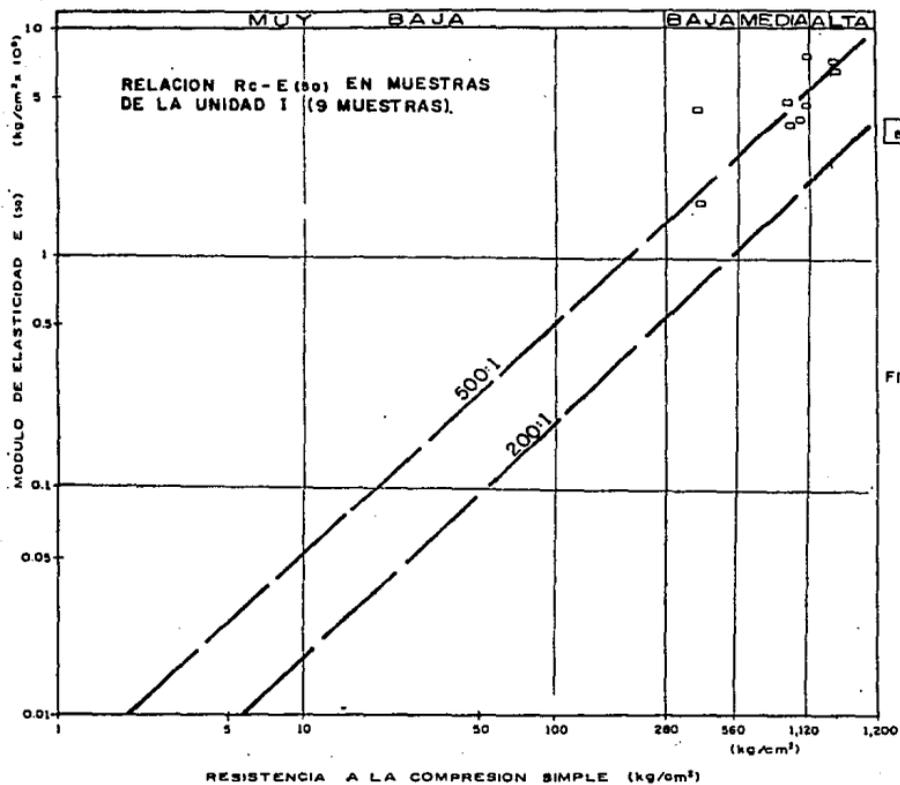


FIGURA 54.1

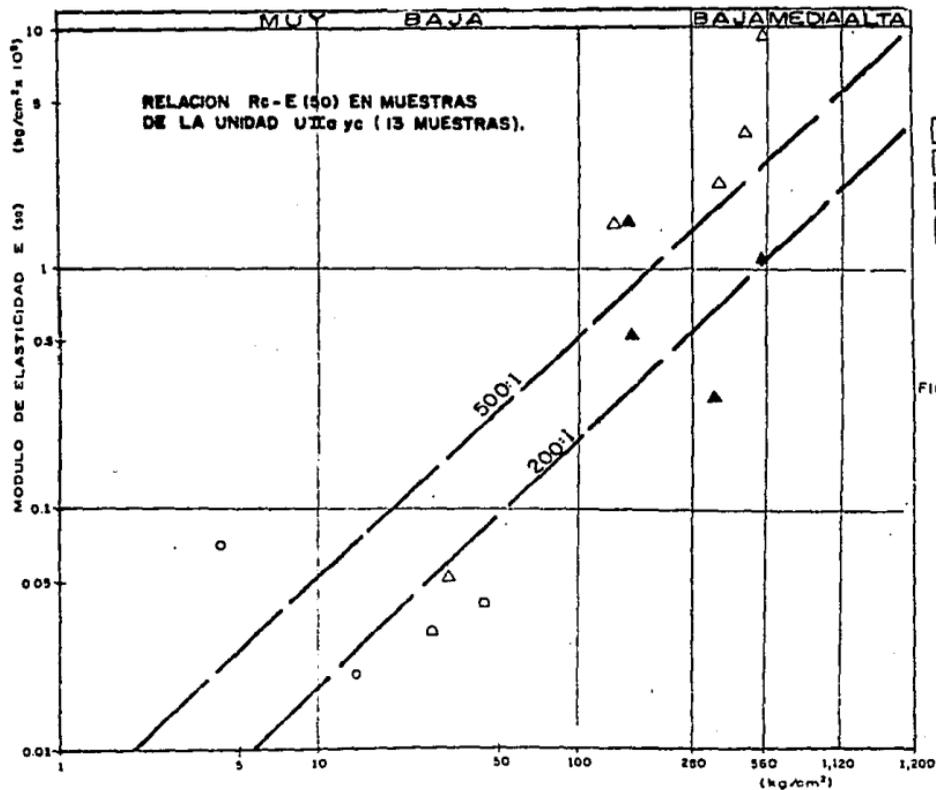


FIGURA 5.4.2

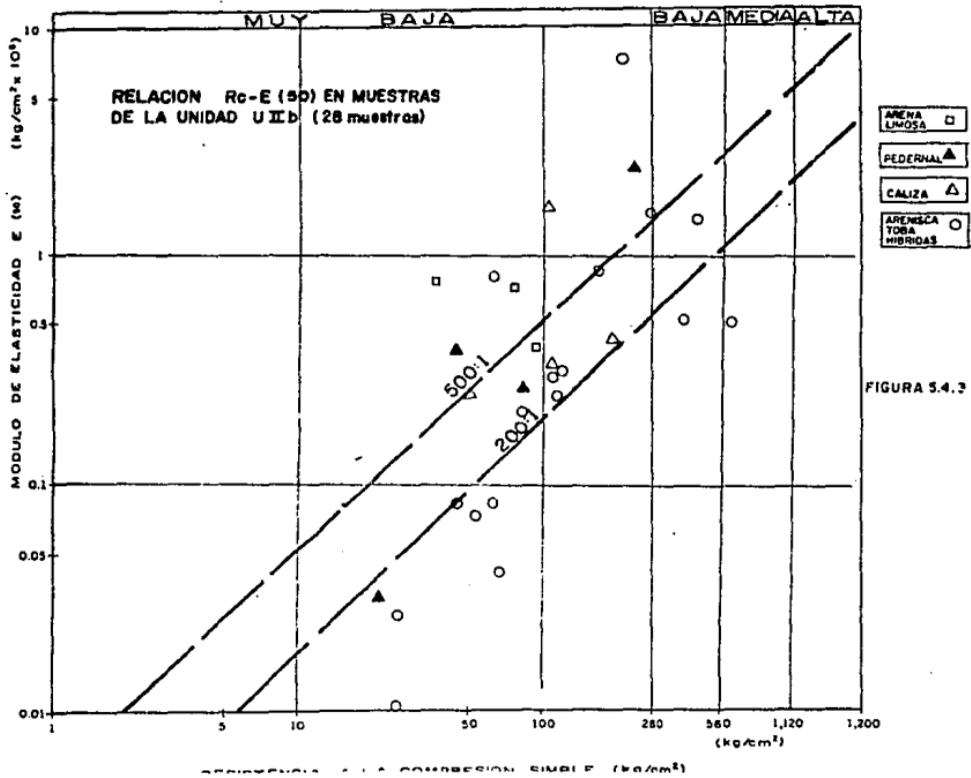


FIGURA 5.4.3

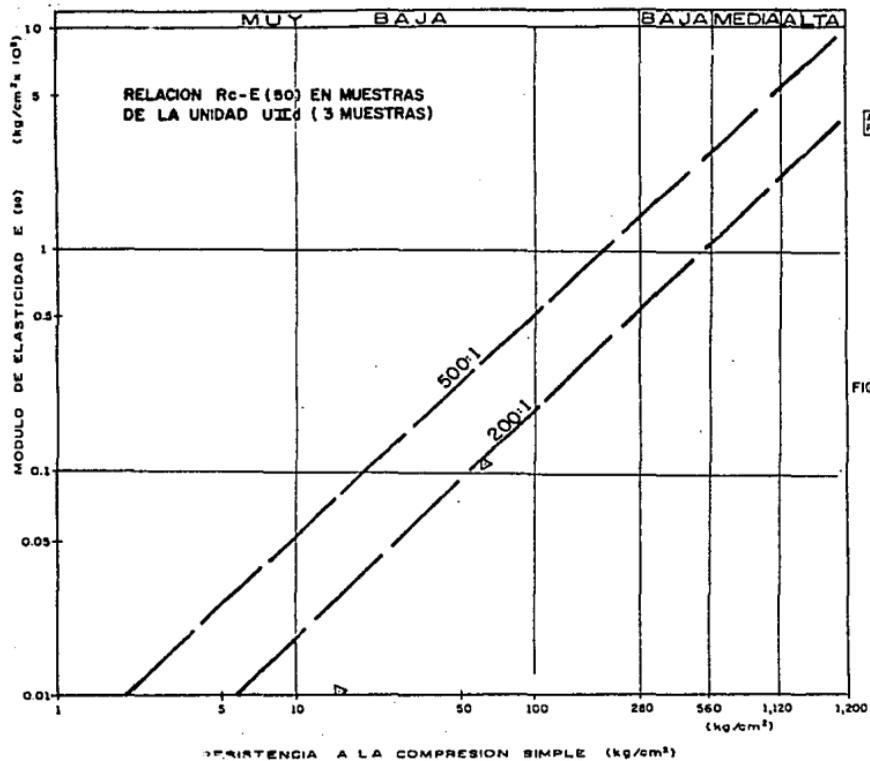


FIGURA 5.4.4

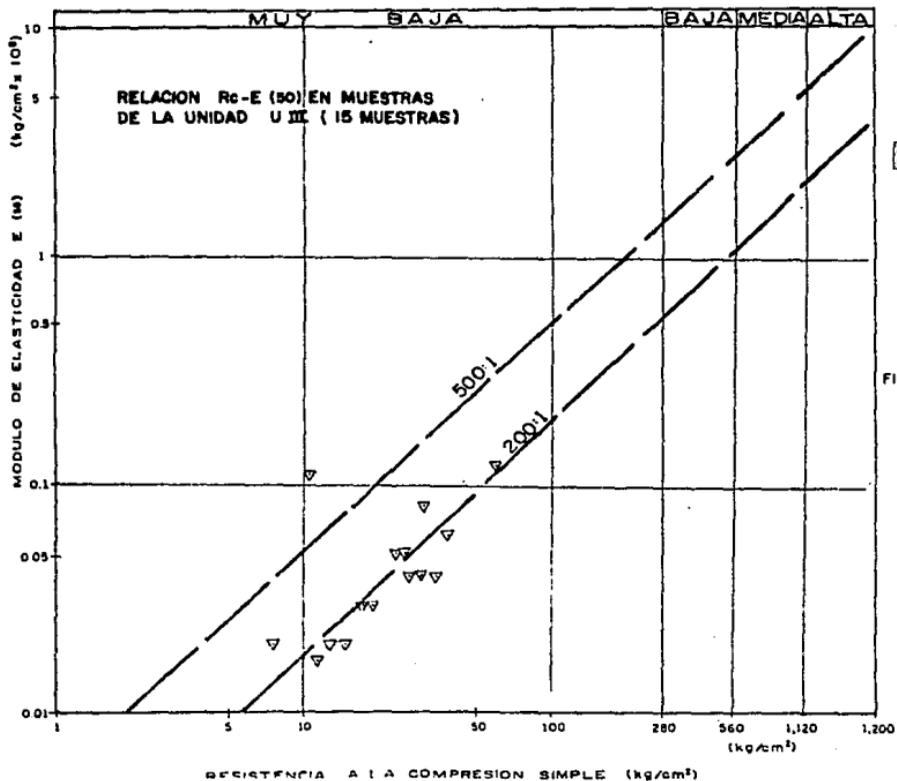


FIGURA 5.4.5

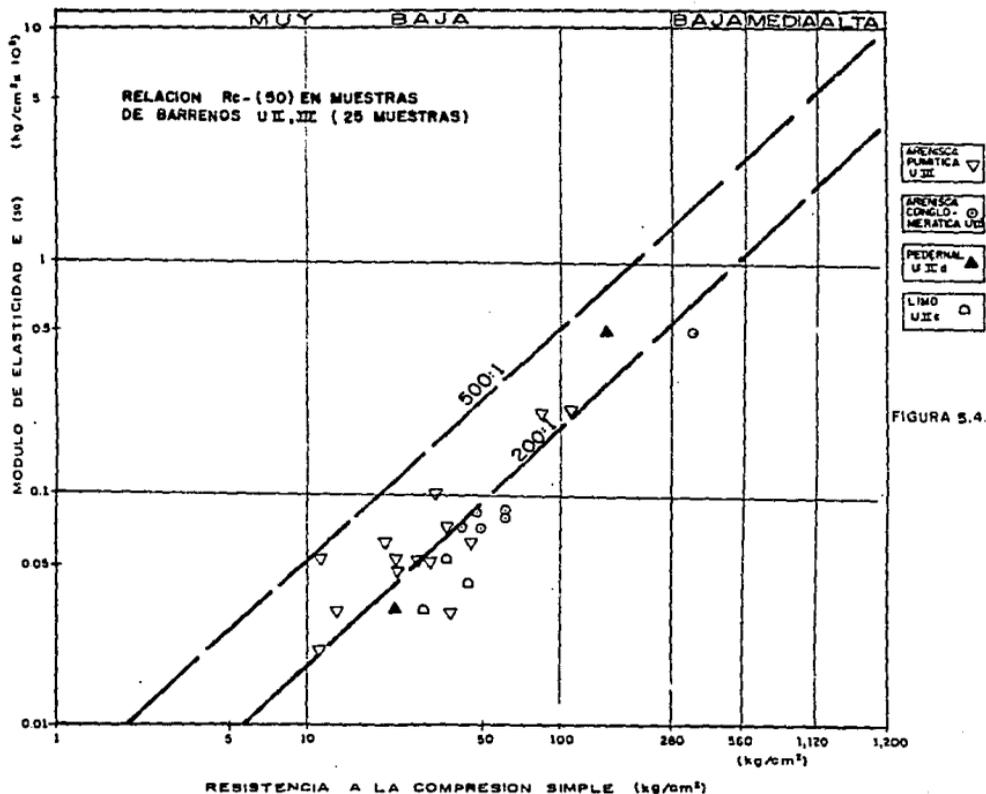


FIGURA 5.4.6

#### 5.4 ANALISIS DE LOS DERRUMBES DEL CAÑON.

Los derrumbes que se observaron en la zona del Cañón corresponden en la mayoría de los casos a acumulación de materiales formados por la erosión de los diferentes tipos de rocas, y solo en un sitio se determinó un posible deslizamiento de ladera producido por inestabilidad de ladera, ubicado en la margen izquierda del Eje 4.

Asimismo, en las zonas donde aflora la roca andesítica el fracturamiento provoca la formación de bloques inestables que caen por volteo.

Las acumulaciones de material por erosión fueron representadas en el plano geológico del Cañón (4.1) como depósitos de talud (Qt) y se distribuyen a lo largo de todo el Cañón y principalmente en la zona comprendida en los Ejes 2 y 3.

El mecanismo por el cual se forman estas acumulaciones se considera que es debido a la baja resistencia a la erosión que presentan la mayoría de los materiales de las unidades II y III, las cuales al haber estado sujetas, en tiempos pasados, a la acción del intemperismo provocado por el agua del Río Verde, y actualmente, al agua de lluvia, se erosionan y provocan el desprendimiento de los materiales que las subyacen, los cuales se van acumulando al pie de las laderas.

Con el tiempo, estos materiales, por encontrarse en un estado prácticamente suelto, llegan a ser removidos y transportados por el Río Verde hacia aguas abajo.

Las zonas donde se encuentran estos materiales sueltos, se caracterizan por presentar una vegetación más abundante que los afloramientos de las unidades litológicas, siendo uno de los rasgos que permiten identificarlos.

En cuanto al deslizamiento de materiales que se observó en el Eje 4, se puede mencionar que fue el único que se observó en toda la zona del Cañón. Posteriormente se hará una descripción de sus características y las evidencias de este deslizamiento.

En las zonas donde afloran las coladas de andesita en la porción superior, es común que se presenten caídos de roca, ocasionados por las fracturas verticales que presenta y que da lugar a que se formen bloques inestables.

A continuación se presenta una descripción de las acumulaciones de material más importantes de la zona del Cañón.

## ZONA EJE 2

La margen izquierda del Eje 2 presenta una de las mayores zonas de talud; se distribuye paralelo al Río Verde en una longitud de 400 a 500 m y desde el nivel del río hasta el contacto con los basaltos; su espesor es variable, en algunos sitios es pequeño (40 a 60 cm) y en otros alcanza los 5 m, según se muestra en las exploraciones directas realizadas en el Eje 2 (Ver plano de secciones de ejes No. 4.2). Los materiales que forman este depósito son arenas y arcillas sueltas, con fragmentos pequeños de calizas y pedernal, así como bloques de mayor tamaño de andesitas.

La margen derecha también presenta dos zonas con talud; la primera de ellas se encuentra en el área del Eje 2, con una longitud de 200 a 300 m y desde el nivel del río hasta las andesitas; el espesor detectado en las exploraciones del Eje 2 indican que varía de 1 a 2 m en su porción superior hasta 15 a 20 m en la parte inferior (Plano 4.2). Está formado por los mismos materiales que en la margen derecha.

La segunda zona se ubica a 200 m aguas abajo del Eje 2, es de menor extensión y solo llega hasta la porción superior de la Unidad II; su espesor se desconoce.

## ZONA DEL EJE 3

La zona de la margen izquierda del eje 3 entre el arroyo ubicado aguas arriba y donde el Río Verde cambia su curso, presenta un claro ejemplo del mecanismo de formación de los derrumbes del Cañón, ya que puede apreciarse como en esa franja se presentan zonas donde la continuidad de la Unidad III es interrumpida por acumulaciones de material suelto con un notable crecimiento de la vegetación; lo cual indica que han existido pequeños deslizamientos locales en diversas partes de la Unidad II.

En el Plano 4.1 se pueden observar las diferentes zonas de acumulación de talud; todas ellas alineadas en dirección perpendicular al río, que se extienden hasta llegar a él y con un ancho de 20 a 40 m.

Su espesor se desconoce, pero debe ser del orden de 1 m en su porción superior y de 5 a 10 m en la parte inferior. Están formados por las arenas y arcillas de las unidades II y III y por bloques de diversos tamaños de andesita que han llegado a caer por volteo o por pequeñas masas deslizadas al caer los materiales de la Unidad II.

En toda esta área se presenta una amplia zona de talud entre los afloramientos de la Unidad III y el Río Verde, que representan las acumulaciones de todo el material que se erosiona de las unidades litológicas superiores.

En la margen derecha de esta zona no se tienen evidencias claras de deslizamientos en toda esta franja, hay una notable continuidad del contacto de la Unidad II y III y pocas zonas de abundante vegetación. Sin embargo, la Unidad II esta cubierta localmente por pequeñas capas de materiales de talud, no cartografiables a la escala del plano geológico. El espesor que indican las perforaciones del Eje 3 es de 40 a 60 cm.

Solo existe otra zona que podría haber sufrido algún movimiento, situada inmediatamente aguas abajo del Eje 3, en donde se aprecia que el derrame andesítico muestra un escarpe de menor inclinación y a una altura menor que el resto de la colada, lo cual podría haberse debido a algún movimiento ocasionado por erosión de las unidades inferiores II ó III. En la porción inferior de las laderas de esta margen y a todo lo largo de esta zona existe acumulación de estos materiales de talud, formados por arenas, arcillas y los bloques de andesita.

#### ZONA ENTRE EJES 3 Y 4

En esta zona no se presentan grandes acumulaciones de material de talud; solamente podría mencionarse las franjas situadas al pie de algunas laderas; de extensión y espesor reducido.

#### ZONA DEL EJE 4

En la margen izquierda del Eje 4, se presentan evidencias geomorfológicas de haber sufrido un deslizamiento de la ladera, de mayores proporciones que las acumulaciones antes descritas. Estas evidencias son: La forma de media luna que presenta entre los arroyos, así como la acumulación de materiales arenosos sueltos al pie de la ladera, en cantidades apreciables y situados por encima de las terrazas aluviales, y con espesores del orden de 10 a 15 m en su porción inferior. En las laderas hay pequeños espesores de talud que cubren a las unidades litológicas.

Por las evidencias anteriores se infiere que el deslizamiento debió haberse producido por la erosión de la Unidad III, que al moverse desplazó una parte de la Unidad II. La margen derecha no muestra evidencias de ningún deslizamiento y solo se aprecian al pie de los taludes, pequeñas acumulaciones de talud por erosión de las unidades litológicas.

#### ZONA DEL EJE 5

La margen izquierda del Eje 5 no presenta materiales de talud, ya que la roca aflora practicamente desde el nivel del río hasta la parte superior de la ladera. En la margen derecha solo hay pequeñas acumulaciones de material de talud erosionado al pie de los taludes.

## 5.5 ANALISIS DE LOS PROBLEMAS GEOTECNICOS.

Los problemas geotécnicos que se postulan en el Proyecto La Zurda son: el posible deslizamiento de alguna ladera por la expansión de las capas de arcilla en la Unidad II (denominado problema I), y la tubificación y rompimiento de la roca por subpresiones en los materiales de la Unidad III (denominado problema II).

Para analizar estos problemas se llevaron a cabo una serie de actividades que permitieron obtener una mayor cantidad de información geológica, necesaria para comprender e evaluar los problemas; algunos de los trabajos fueron desarrollados como parte de esta etapa para sensibilizar el problema. Sin embargo, algunos otros estudios complementarios serán realizados, posteriormente; como son sondeos directos, registros geofísicos de poros, estudios geosísmicos y levantamientos geológicos detallados de los ejes.

Para cada uno de los citados problemas se analizan las características geológico-geotécnicas de las unidades litológicas que sean importantes para el estudio de cada problema; posteriormente, se elaborará un modelo geotécnico que conjuga la información disponible y se planteen las conclusiones de cada problema geotécnico.

### 5.5.1 Problema I. (Estabilidad)

Las características geológico-geotécnicas de la Unidad II obtenidas de los estudios anteriores y que tienen influencia en el análisis de este problema se resumen a continuación:

#### - ESTUDIO DE LAS ARCILLAS

Las arcillas son los materiales relevantes para el análisis del problema de estabilidad, por lo que se presentan los datos obtenidos sobre sus características geológico-geotécnicas.

- **Distribución por Unidades.** - Con el estudio estratigráfico detallado fue posible definir que en la Unidad II, las arcillas se encuentran básicamente en las subunidades UIIa y UIIc; en donde están intercaladas con otras rocas más compactas, como los pedernales y celizas.

La Unidad UIIa aflora desde el Eje 1 hasta el Eje 4 y no aparece en la zona del Eje 5; el espesor promedio de este paquete resultó de 15 m, mientras que la Unidad UIIc si se presenta en todos los ejes y su espesor promedio fue de 17 m; sin embargo, a partir del Río Ipalco el espesor de esta unidad aumenta hasta 69 m.

En las secciones geológicas del Plano 4.2 se puede apreciar claramente la distribución de las Unidades UIIa y UIIc en el Cañón.

- **Distribución por Columna.**- La distribución de arcillas y limos por columna estratigráfica medida se presenta en la Tabla 4.1. En ella se hacen dos consideraciones: la primera es tomando en cuenta como arcillas únicamente las que se midieron en cada columna; sin embargo, dado que muchas zonas se encuentran cubiertas por material de talud que enmascara a las arcillas, la segunda consideración, fue suponer que debajo de este talud pudieran existir un 50% de materiales finos, de modo sobreestimado.

También se llevó a cabo un análisis de la distribución de arcillas por ejes, (Tabla 5.7) extrapolando la información de las columnas, con la finalidad de que se tenga una idea de cuanto arcilla se presentaría en los ejes.

Tabla 5.7 Porcentaje de Finos por Eje.

EJE	UNIDAD O SUBUNIDAD	PORCENTAJE AFLORANTE	PORCENTAJE CONSIDERANDO TALUD*
1	UIIa	37.32	37.32
	UIIc	40.15	49.4
	UII	27.70	29.7
2 y 3	UIIa	32.1	49.8
	UIIc	18.3	53.2
	UII	27.3	34.7
4	UIIa	31.8	31.6
	UIIc	12.1	42.3
	UII	23.3	35.2
5	UIIa	0	0
	UIIc	30.2	30.7
	UII	30.0	34.2

\* Estimando 50% de finos en la porción cubierta.

Es importante mencionar que el espesor de las capas de arcilla varia en términos generales entre 10 y 140 cm, con un promedio de 30 cm.

Como resultado de los análisis anteriores, se desprende el hecho que la cantidad de arcillas es más reducido de lo que se consideraba en informes anteriores; ya que este material solo se presenta en dos subunidades (UIIa y c) que corresponden aproximadamente el 30% de la Unidad II, y además el porcentaje de arcillas en estas subunidades es del orden del 40% y están intercaladas, con rocas más compactas.

- **Tipo de Arcillas.**- Los resultados de los estudios de difracción de Rayos X y los análisis químicos por fluorescencia de Rayos X indican que las arcillas de la Unidad II son del tipo de las Illitas y Montmorillonitas, con un elevado porcentaje de calcita y cuarzo. (Ver Capítulo 4). La Tabla 5.8 resume el porcentaje promedio del tipo de arcillas de la Unidad II del Cañón.

Tabla 5.8 Porcentaje Promedio de Minerales en Unidad II.

MINERAL	SUBUNIDAD Ila	SUBUNIDAD IIc	SUBUNIDAD II
- Cuarzo	29.6	30.8	31.5
- Illita	22.2	24.3	25.4
- Calcita	28.5	19.3	20.6
- Montmorillonita	7.4	8.0	8.0
- Albita	4.9	6.5	7.0
- Limonita	3.9	4.7	4.4
- Agua	5.5	4.2	4.9

Como se desprende de la Tabla anterior, la mineralogía no es homogénea, sino que hay varias clases, en donde el porcentaje de arcillas Montmorilloníticas es bajo, además de que se encuentra contaminado con otros minerales; estas características favorecen la reducción de su poder expansivo ya que las illitas tienen una superficie de expansión menor que las montmorillonitas. Esto es 65-105 m<sup>2</sup>/gr contra 210-750 m<sup>2</sup>/gr y se presentan en mayor porcentaje, por lo que la presión de hinchamiento no rebasará 1 kg/cm<sup>2</sup> (Attwell y Farmer, 1975).

En las secciones geológicas del Plano 4.2 se puede apreciar claramente la distribución de las Unidades UIIa y UIIc en el Cañón.

- **Distribución por Columna.**- La distribución de arcillas y limos por columna estratigráfica medida se presenta en la Tabla 4.1. En ella se hacen dos consideraciones: la primera es tomando en cuenta como arcillas únicamente las que se midieron en cada columna; sin embargo, dado que muchas zonas se encuentran cubiertas por material de talud que enmascara a las arcillas, la segunda consideración, fue suponer que debajo de este talud pudieran existir un 50% de materiales finos, de modo sobreestimado.

También se llevo a cabo un análisis de la distribución de arcillas por ejes, (Tabla 5.7) extrapolando la información de las columnas, con la finalidad de que se tenga una idea de cuanto arcilla se presentaría en los ejes.

Tabla 5.7 Porcentaje de Finos por Eje.

EJE	UNIDAD O SUBUNIDAD	PORCENTAJE AFLORANTE	PORCENTAJE CONSIDERANDO TALUD*
1	UIIa	37.32%	37.3%
	UIIc	40.15	49.4
	UII	27.70	29.7
2 y 3	UIIa	32.1	49.8
	UIIc	18.3	53.2
	UII	27.3	34.7
4	UIIa	31.8	31.8
	UIIc	12.1	42.3
	UII	23.3	35.2
5	UIIa	0	0
	UIIc	30.2	30.7
	UII	30.0	34.2

\* Estimando 50% de finos en la porción cubierta.

#### Granulometría:

Arena fina (60-70%), arena gruesa (5 a 8%) y limos de baja compresibilidad (28 a 35%) con LL=36.4 a 37.7% y LP=9.9 a 11.3%.

Existe un porcentaje entre el 13 a 20% de grumos muy cementados y de material que no son fácilmente disgregados.

#### Estructuras:

Masiva.

#### Fracturamiento:

Escasas fracturas mayores, con echados entre 75 y 90 grados de amplio espaciamiento, subcontinuas (entre 5 y 20 m); la mayoría están abiertas, con relleno silíceo o arcilloso; con superficies onduladas y rugosas, y de baja resistencia. No hay microfracturamiento.

#### Espesor:

En el Cañón aflora entre 40 m (Eje 1) y 50 m (Eje 5). Bajo el río se ha perforado hasta 70 m sin encontrar su base (Eje 3). En conclusión se estima un espesor mayor de 110 m.

#### Material Subyacente:

En la zona de estudio la unidad masiva descansa discordantemente sobre la ignimbrita riolítica. El contacto fue observado en el arroyo que desemboca en el Río Verde por su margen izquierda, aguas abajo del Eje 1.

#### Intemperismo:

El macizo rocoso presenta un intemperismo que varía de ligero a moderado; sin determinarse aun el espesor de los perfiles de intemperismo con geofísica.

#### Propiedades Físicas y Mecánicas (promedios de muestras superficiales):

- Densidad	1.77	gr/cm <sup>3</sup>
- Resistencia a la compresión	25	kg/cm <sup>2</sup>
- Módulo de elasticidad estático	4,000	kg/cm <sup>2</sup>
- Resistencia al esfuerzo cortante (Marsal, 1957).	10	kg/cm <sup>2</sup>

#### Propiedades Dinámicas (muestras superficiales):

- Velocidad onda longitudinal	1,346	m/s
- Velocidad onda transversal	698	m/s
- Módulo de elasticidad dinámico	26,600	kg/cm <sup>2</sup>
- Relación de Poisson	0.31	

#### Nivel Freático:

En el sondeo 1 del Eje 5, en margen izquierda, se detectó al nivel del Río Verde a una distancia de 200 m, en el mes de febrero (testiaje). En las perforaciones del Eje 3, en mayo de 1984 también se detectó prácticamente al nivel del río.

#### Variaciones Laterales:

En la zona del Cañón de La Zurda no se apreciaron variaciones laterales significativas en lo que respecta a su litología, granulometría, estructura, fracturamiento y compacidad. Únicamente el intemperismo del macizo es ligeramente más acentuado en algunas porciones que han estado más tiempo bajo este proceso y en otras se aprecia más ligero por haber sufrido cortes o caídos recientes de material intemperizado.

Sin embargo, en lo que respecta a sus propiedades mecánicas si se presentan variaciones a lo largo del Cañón; la resistencia a la compresión varió entre 7.5 y 59.1 kg/cm<sup>2</sup> y la velocidad de la onda primaria osciló entre 625 y 3000 m/s, lo cual indica una amplia dispersión; que han sido atribuidas al grado de intemperismo y cementación de estos materiales.

#### Variaciones a Profundidad:

Los resultados de los barrenos 1 y 2, en el Eje 5, en donde se obtuvo una buena recuperación (80-100%) indican una muy ligera mejoría en la compacidad y cementación de la roca.

Los núcleos de los barrenos indican ligeras variaciones en la compacidad y granulometría a lo largo de la perforación. Los resultados de las pruebas de laboratorio a los núcleos indican también una dispersión en los valores de algunas propiedades como se muestra en la Tabla 5.11; además de que no hay un aumento gradual de los valores a profundidad.

En las gráficas 5.4.5 y 5.4.6 de las clasificaciones de Deere y Miller puede observarse la dispersión de los valores de resistencia de las muestras superficiales y de núcleos de la Unidad III.

Tabla 5.11 Cuadro Comparativo de las Propiedades Físicas y Mecánicas de Muestras Superficiales y de Núcleos de los Barridos 1 y 2, Eje Z, en la Unidad III.

MUESTRA		DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO (kg/cm <sup>2</sup> x 10 exp5)	MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (kg/cm <sup>2</sup> x 10 exp5)	VELOCIDAD ONDA FRÍASE (m/s)
SUPERFICIAL	Promedio	1.77	25.4	0.04	0.266	1746
	Rango	1.61 - 2.10	7.5 - 59.1	0.01 - 0.12	0.046 - 1.133	625 - 2500
BARRIDOS	Promedio		27.10	0.06	0.706	1467
	Rango		10.3 - 55.0	0.02 - 0.10	0.131 - 0.645	1020 - 2101

## Permeabilidad:

Para estudiar la permeabilidad del marizo rocoso, se llevo a cabo un análisis de la información existente de las pruebas realizadas en el Eje 2 en 1974 (Escobar M.) y 1946 (J. Ortiz); así como en el Eje 3 en 1982 (Silva, E.).

### Eje 2

En las exploraciones del Eje 2 de 1948 no se realizaron pruebas de permeabilidad.

En los estudios de 1974, las pruebas Lefranc dieron valores promedio entre 10 exp-5 a 10 exp-4 cm/s hasta 40 m de profundidad y en algunos tramos llegaron a presentarse valores de 10 exp-4 cm/s de 35 a 40 m en el Bno XI y de 10 exp-7 cm/s de 20 a 25 m en el Bno X.

Las pruebas Lugeon se realizaron solo en la margen izquierda, dando valores entre 0 y 2.2 U.L. soportando presiones máximas de 6 kg/cm<sup>2</sup>; por lo que el calculo se hizo por extrapolación. En los tramos probados la presión varió entre 5 y 5.5 kg/cm<sup>2</sup> hasta profundidades de 40 m.

Por lo tanto, se concluye que ninguna prueba se llevo hasta los 10 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual indica que la roca no soporta una presión mayor, y además, se considera que los valores de unidades Lugeon no son representativos, ya que no se alcanzó la presión especificada por la prueba Lugeon.

### Eje 3

Las pruebas Lefranc indican que los primeros 10 o 15 m tienen valores de permeabilidad de 10 exp-4 a 10 exp-5 indicativos de un material poco permeable a permeable. Sin embargo, en el barrenos 3 se obtuvieron valores de 10 exp-6 a 10 exp-10.

Las pruebas Lugeon realizadas en ambas márgenes indican que en los primeros 10 m no fue posible realizar las pruebas; entre 10 y 35 m se levantaron presiones entre 4 y 8 kg/cm<sup>2</sup>; por lo que las unidades Lugeon se cuantificaron por el procedimiento de extrapolación antes del rompimiento, con valores entre 0.2 y 7 U.L., solo hasta los 35 m de profundidad se logró llegar a la presión de 10 kg/cm<sup>2</sup> o más, dando valores muy bajos de 0 a 3.6 U.L..

Sin embargo, de los tres barrenos ubicados en la zona del cauce, solo el No. III resulto impermeable desde la superficie y se alcanzaron los 10 kg/cm<sup>2</sup> desde los 35 m. de profundidad, con valores de 0.4 a 2.2 U.L.; sin embargo, en los barrenos IV y V no se levanto más de 5 kg/cm<sup>2</sup> a 30 m. de profundidad y más de 6.1 kg/cm<sup>2</sup> hasta 70 m., con zonas intermedias que no alcanzaron más de 3.3 kg/cm<sup>2</sup> de presión, estimando hasta 35 U.L.

Las zonas donde se obtuvieron los mayores valores de permeabilidad y donde la roca soportó las presiones más bajas se localiza por debajo del cauce del Eje 3, lo cual podría atribuirse a zonas poco compactas y sin cementante.

En las laderas del Eje 3 se obtuvieron mejores valores de permeabilidad y se levantaron presiones de hasta 14 kg/cm<sup>2</sup>, lo cual indica que la roca en ambas márgenes es de mejor calidad que en el cauce.

#### Evidencias de Tubificación.

Se reporta que en 1958, durante los trabajos de excavación para alojar el corazón impermeable se detectaron filtraciones en la Unidad III, con localización puntual produciendo arrastre de particular de arena de la formación, estableciendo el riesgo de tubificación.

#### - Análisis del Problema II.

La tubificación se ha descrito como un proceso de erosión iniciado aguas abajo de una presa que puede progresar de esta manera hacia el embalse en la forma de un ducto o tubo. Al avanzar el proceso, se generan concentraciones de flujo y gradientes hidráulicos cada vez mayores en el extremo de aguas arriba del ducto, hasta que al llegar a las proximidades del embalse, se crea una vía continua para el agua y la falla de la presa es inminente.

En esta etapa de estudio no se tienen los suficientes elementos para determinar cuantitativamente la tubificación. Los argumentos que se tienen actualmente para evaluar el problema en el proyecto de La Zurda, son los siguientes:

- Las características de la unidad litológica que constituye la cimentación de la presa indican que se trata de un material susceptible de ser tubificado; ya que son materiales arenosos debilmente cementados, aunque con una buena trabazón, poco resistentes y en ciertos sitios deleznable por presencia de agua; forman por arenas uniformes, de tamaño fino y en menor proporción limos; además por ser de origen pumítico son ligeros, resultando particularmente afectados por el flujo del agua.

Diversos autores coinciden en mencionar a materiales con las características anteriores, como los más susceptibles de sufrir tubificación (Rico, 1982; Sowers, 1978; Bell, 1980).

Sin embargo, de acuerdo con diversos autores la propiedad más importante para evaluar la resistencia a la tubificación en suelos arcillosos es el índice de plasticidad; ya que las arcillas de plasticidad alta (Ip mayor de 15) ofrecen la máxima resistencia de partículas por las fuerzas de filtración, en tanto que los materiales con Ip menor de 6 constituyen los precedentes menos satisfactorios.

En el caso de La Zurda sólo se obtuvieron los índices de plasticidad de la fracción fina dos muestras que indican valores del orden de  $I_p = 26$ ; sin embargo, por el poco número de ensayos no se consideran representativos estos resultados y por otro lado, el tamaño que predomina es el de las arenas y en menor proporción los limos, por lo que se minimiza el efecto de la plasticidad.

Por otro lado, los resultados generales de las pruebas de permeabilidad de algunos de los ejes indican que los materiales de la Unidad III tienen una permeabilidad baja. Sin embargo, en las pruebas Lugeon los materiales no soportaron, en términos generales, presiones mayores de 6 kg/cm<sup>2</sup> en los primeros 30 m y se extrapoló la información para obtener las Unidades Lugeon. Estos valores indican que la resistencia de las areniscas bajo una presión puntual de agua es baja; lo cual hace pensar que se facilite el proceso de tubificación en las capas superiores cuando se genere la presión del agua por el embalse (8 kg/cm<sup>2</sup>).

Otra conclusión que se desprende del análisis de las permeabilidades es la variación que existe en los valores de permeabilidad, tanto lateralmente como a profundidad, lo cual podría ocasionar concentraciones de flujo peligrosas para la tubificación. Esto se manifiesta en la zona del cauce del Eje C, en donde de un barreno a otro hay notables variaciones, así como a profundidad.

Un detalle importante es el hecho de que las características del fracturamiento indican que es poco probable que las variaciones en los valores de permeabilidad sean ocasionados por fracturas.

Por otro lado, puede considerarse que la Unidad III es homogénea, en cuanto a sus características petrográficas, texturales y estructurales, así como en su compactación. Sin embargo, en sus propiedades físicas si se observan variaciones significativas de un sitio a otro del Cañon de La Zurda, y aún más, a profundidad también existen variaciones, ya que no hay un aumento gradual en las propiedades, que indican diferencias en el grado de trabazón o cementación de los granos de la arenisca.

Esta conclusión es importante puesto que estas variaciones pueden dar lugar a concentraciones de flujo a lo largo de zonas más permeables que facilitan la tubificación.

Los bajos valores obtenidos de las pruebas de Resistencia a la Compresión Simple y modulus de elasticidad indican la mala calidad de la roca al someterse a presiones; sin embargo, deberá considerarse el aumento de estas propiedades por la presión de confinamiento.

No se ha desarrollado una forma precisa de evaluar cuantitativamente la tubificación; algunos autores han propuesto factores de seguridad basados en el conocimiento de las propiedades hidráulicas de los materiales de la cimentación.

Resendiz (1975) menciona que conociendo los gradientes hidráulicos en las superficies de salida es posible estimar el Factor de Seguridad contra tubificación. Por ejemplo, asume que si se tiene un material de cohesión despreciable, una estimación del Factor de Seguridad sería la relación entre el peso volumétrico sumergido del material de cimentación (fuerza resistente) y el producto del gradiente hidráulico de salida por el peso volumétrico del agua (fuerza actuante).

Sin embargo, el mismo autor menciona que en las formaciones naturales hay detalles geológicos cuya detección resulta imposible mediante los métodos usuales de exploración del subsuelo y la influencia de esos detalles, como son las variaciones en la permeabilidad, en problemas de esta naturaleza, es tal que puede alterar, localmente, en forma radical la red de flujo, volviendo inaplicable la solución idealizada que se obtiene mediante el procedimiento anterior.

Tenzaghi y Peck (1967) proponen un Factor de Seguridad definido por:

$$FS = \frac{W}{H} = \frac{(D) (G')}{(h) (G_w)}$$

en donde:

W = peso

H = presión hidrostática

D = profundidad

G' = peso específico sumergido

h = carga hidráulica

G<sub>w</sub> = peso específico del agua

El mismo autor menciona que se debe de tomar con mucha reserva esta ecuación, ya que fue propuesta para tubificación por levantamiento del sustrato (heave) que puede ocurrir a corto o largo plazo después del primer llenado del embalse. Además de que los detalles geológicos como variaciones en granulometrias son difíciles de certificar por los medios prácticos de la exploración existente.

Terzaghi y Peck (1967) proponen las reglas empíricas para evaluar el F.S. contra tubificación por erosión fueron propuestas por Bligh (1910) atribuyendo que la erosión ocurre a lo largo de la superficie de contacto entre el suelo y la base de la presa, denominando como "línea de flujo" (line of creep), y denominado por "L" en la ecuación:

$$C_c = \frac{L}{h}$$

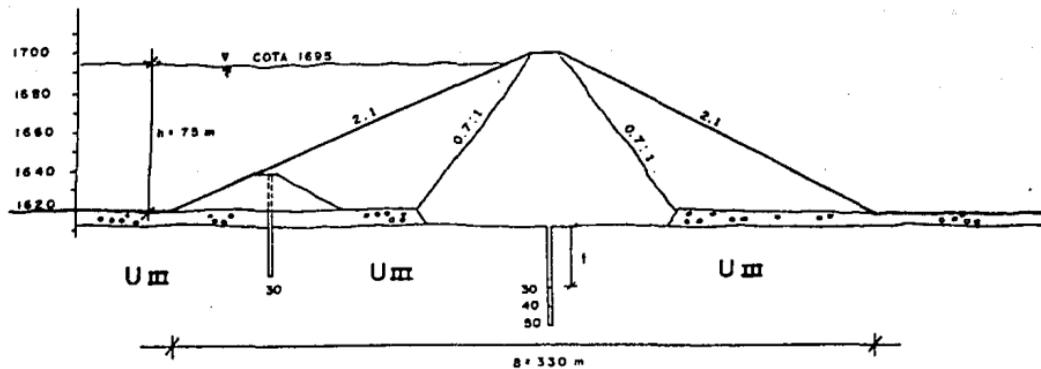
$$C_c = \frac{L}{h} = \frac{t_1 + t_2 + R}{h}$$

La relación de flujo (creep ratio) "Cr" para los casos histórico indicaban que los valores aumentaban de 4 para gravas y de 18 para arenas finas y limos. Después de 30 años se encontró que la relación de permeabilidades horizontal/vertical estaba más desarrollada en el sentido horizontal. Para considerar la eficiencia de las secciones verticales de las líneas de flujo se modificó de modo que una sección horizontal sea un tercio de una sección vertical de igual longitud y se defina la relación de flujo modificada como:

$$C_m = (1/3 F + t_n)/h$$

Para los propósitos de este documento, tentativamente se evaluó un factor de seguridad por erosión para darse una idea de las dimensiones del problema considerando los datos de la Figura 5.9, de donde se concluye que los factores de seguridad (3.16 a 3.49) son bajos, si los comparamos con los publicados en el artículo 63 de Terzaghi y Peck (1967), los que debieron ser mayores de 7 para materiales similares.

MODELO IDEALIZADO PARA EVALUAR EL FACTOR DE SEGURIDAD POR  
EROSION Y/O TUBIFICACION TIPO "CREEP RATIO" EN LA UNIDAD III



$t$	$(\frac{1}{3}B + tn) / h$	F.S.
30	$110 + 67 + 60 / 75$	3.16
40	$110 + 87 + 60 / 75$	3.43
50	$110 + 107 + 60 / 75$	3.69

CONSIDERANDO  $KH / Kt = 3$

FIGURA 5.9

## 6 SUMARIO, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resume la información recabada y obtenida a lo largo del estudio. Asimismo se establecen las conclusiones finales a las que se llegó, dando en el caso necesario, las recomendaciones adecuadas que ayuden a definir sobre los aspectos que hasta esta parte del estudio aún quedan dudosos o poco claros.

### 6.1 Características Geológico-Geotécnicas de las Unidades Litológicas

Como resultado del estudio Geológico Superficial del Cañón de La Zurda se lograron diferenciar un total de siete unidades litológicas, una de ellas (Unidad II) fue posible subdividirla en cuatro subunidades.

Esta diferenciación se trató de llevar al máximo detalle posible por las implicaciones geotécnicas que tienen ellas en el comportamiento de la futura presa.

Como conclusión sobre las características de cada unidad litológica se presenta a continuación un resumen que incluye una descripción de los tipos de roca y sus características geológicas de mayor importancia; en la zona del Cañón; un análisis de los rasgos más importantes de las discontinuidades; así como las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta, obtenidas con las pruebas de laboratorio de Mecánica de Rocas y por último, se interpreta el comportamiento geotécnico en relación al proyecto de Presa.

#### MATERIALES DE ACARREO (Qac)

Los materiales de acarreo se distribuyen a lo largo del cauce del Río Verde y sus principales afluentes.

##### - Litología.

Compuesto principalmente por fragmentos de andesitas, basaltos, ignimbritas y calizas, en tamaños desde arenas de grano medio a gravas, así como bloques de roca en menor proporción.

El espesor detectado en las exploraciones indica que varía de 8 a 10 m.

##### - Comportamiento Geotécnico.

Estos materiales se consideran permeables ( $K = 5.07 \times 10^{-6}$  a  $7.60 \times 10^{-3}$  cm/seg) por lo que habrán de removerse totalmente en la zona de desplante de la cortina.

Por otro lado, pueden ser utilizados como agregados para la elaboración del concreto o como filtros para la cortina.

#### **MATERIALES DE TALUD (Qt)**

Los depósitos de talud se distribuyen a lo largo de las partes bajas de las laderas y en algunas zonas, en las porciones medias de los taludes; son originados por la erosión de las rocas más antiguas.

##### **- Litología.**

Material formado principalmente por limos y arenas finas, y en menor proporción gravas y cantos de calizas, pedernal y andesitas. Se encuentran en estado suelto y presentan en la mayoría de los sitios una pequeña capa de materia orgánica. Su espesor varía entre 0.60 y 20 m.

##### **- Comportamiento Geotécnico.**

Dado el estado suelto son materiales fácilmente erosionables e inestables. Estos materiales son importantes puesto que indican las zonas que han sufrido deslizamientos o desprendimientos con mayor frecuencia.

#### **TERRAZAS ALUVIALES (Qte)**

Las terrazas aluviales se presentan a todo lo largo del Cañón, entre el cauce del río y los depósitos de talud o unidades litológicas.

##### **- Litología.**

Materiales formados básicamente por arenas y limos, en estado suelto y de muy baja compacidad y con espesores de 3 a 4 m. En algunas zonas de meandros las terrazas se forman principalmente por gravas y arenas gruesas de rocas andesíticas e ignimbríticas.

##### **- Comportamiento Geotécnico.**

La importancia geotécnica fundamental es como fuente potencial de gravas y arenas, necesarias para las transiciones de la cortina y agregados de concreto.

## **UNIDAD SUPERIOR VULCANOCLASTICA (Us)**

La Unidad Us en la zona del Cañón aflora únicamente en las partes topográficamente altas, cubriendo a las Unidades II y III.

### **- Litología.**

Cenizas y lapilli depositados en ambiente lacustre, intercalados con areniscas y limos-arcillosos y en menor proporción horizontes y lentes de calizas y pedernales.

La unidad está poco compacta, suave y deleznable.

### **- Discontinuidades.**

La principal discontinuidad es la estratificación en capas de 5 a 20 cm. Existen pequeñas fracturas de poca continuidad.

### **- Variaciones en el Cañón.**

En algunas zonas se presenta una brecha de pedernal y basalto en la porción inferior.

### **- Propiedades Físicas y Mecánicas.**

No se realizaron pruebas de laboratorio.

### **- Comortamiento Mecánico para la Presa.**

Por encontrarse en las partes altas de las laderas no tiene importancia desde el punto de vista geotécnico. Sin embargo, podría ser útil como banco de material arcilloso.

## **UNIDAD ANDESITICA (UI)**

Las andesitas se presentan formando mesetas en la porción superior del Cañón, entre los Ejes 2 y 3. Descansan discordantemente sobre la Unidad UIId y en algunos sitios cubierta por pequeños espesores de la Unidad Superior Vulcanoclástica (Us).

### **- Litología.**

Andesita gris de textura afanítica, localmente amigdaloidal, se encuentra en general compacta y sana, aunque localmente esta hematizada. La estructura que forma es un extenso derrame que aflora en la parte superior de ambas margenes, formando una extensa meseta.

#### - Discontinuidades.

El macizo rocoso se encuentra moderadamente fracturado; presenta tres sistemas principales; los mas importantes son los denominados OMEGA y PSI de inclinación casi vertical, en promedio los espaciamientos varían de amplios a muy amplios; con una continuidad de media a alta; la mayoría cerradas y algunas abiertas, las superficies se presentan de onduladas lisas a rugosas.

El sistema RHO es subhorizontal, con un espaciamiento muy cerrado, sin embargo es subcontinua con longitudes medias; están cerradas a entreabiertas y con superficies planas rugosas.

#### - Variaciones en el Cañón.

En algunos sitios donde fluyó sobre sedimentos húmedos, presenta una estructura brechoide en su base, compacta y de color rojizo.

#### - Propiedades Físicas y Mecánicas.

Presenta una densidad alta (2.46 gr/cm<sup>3</sup>) su resistencia a la compresión es media (838 kg/cm<sup>2</sup>), con modulos de elasticidad altos que indican una roca dura (E est = 442,000 kg/cm<sup>2</sup> y E din = 614,000 kg/cm<sup>2</sup>), la poca diferencia en ambos modulos indica la buena calidad de la roca, y por último las altas velocidades de onda longitudinal (5,545 m/s) la califican como una roca muy compacta y nada microfracturada.

#### - Comportamiento Mecánico para la Presa.

Los problemas geotécnicos de las andesitas son:

- La alta densidad de la roca sobre las unidades blandas infrayacentes aumenta las fuerzas actuantes en la estabilidad del macizo rocoso.
- La conjugación de los sistemas de fracturas da lugar a la formación de bloques de roca con posibilidad de caer por volteo.

La andesita presenta buenas características para utilizarse como banco de enrocamiento para la cortina.

## UNIDAD II

La Unidad II está formada por una secuencia estratificada de rocas sedimentarias de origen lacustre y fluvial, con gran aporte de material volcánico. Se distribuye a lo largo de todo el Cañón, en la porción media y superior de las laderas. Cubre en todos los sitios a la Unidad III y le infrayace a la Unidad I, o bien a la Unidad Us.

Dada su importancia geotécnica, esta unidad se estudio con el mayor detalle posible y así, fue posible subdividirla en cuatro subunidades que presentan un origen, litología y comportamiento geomecánico diferente:

### UNIDAD PUMITICA (UIId)

#### - Litología.

Arenisca pumítica dacítica color gris verdoso, de grano grueso; con una típica estratificación laminar con rizaduras y graduación normal; se encuentra compacta, la dureza varia de media a muy baja y con un ligero grado de intemperismo.

#### - Discontinuidades.

La estratificación es horizontal y con espesores de capa pequeños; presenta dos sistemas de fracturas, de moderado espaciamiento, subcontinuas, de 3 a 10 m de longitud, entreabiertas y de superficies planas rugosas.

#### - Variaciones en el Cañón.

Las únicas variaciones de esta unidad son las zonas deformadas abajo de las andesitas por el peso de ellas.

#### - Propiedades Físicas y Mecánicas.

Su densidad es baja (1.86 kg/cm<sup>2</sup>) por su componente pumítico; la resistencia es muy baja (38 kg/cm<sup>2</sup>) y sus módulos indican la mala calidad de la roca, que se confirma con la baja velocidad de transmisión de ondas longitudinales (1,537 m/s).

#### - Comportamiento Mecánico para la Presa.

La baja resistencia de esta roca facilita la inestabilidad de bloques de la andesita que la subyace.

## UNIDADES LACUSTRE SUPERIOR E INFERIOR (UIIa-c)

### - Litología.

Intercalación de rocas blandas (limos y arcillas) con rocas compactas (pedernales, calizas y areniscas). Las primeras presentan una consistencia moderada, muy baja dureza y están muy intemperizadas. Las rocas compactas son de dureza moderada y con un ligero intemperismo.

### - Discontinuidades.

La estratificación es sensiblemente horizontal. Solo hay fracturas menores que afectan a las rocas compactas; se lograron definir tres sistemas; todos ellos subcontinuos y de espaciamientos moderados a amplios, y la mayoría cerradas.

### - Variaciones.

Estas unidades muestran pocas variaciones litológicas a lo largo del Cañón; solamente hay diferencias notables en los espesores.

La Unidad UIIa tiene un espesor que varía de 10 a 15 m y no se presenta en la margen izquierda del Eje 5, ni en la margen derecha de los Ejes 4 y 5.

La Unidad UIIc varía de 10 a 16 m (Ejes 1, 2 y 3) y de 10 a 24 m (Ejes 4 y 5).

### - Propiedades Físicas y Mecánicas.

Las rocas compactas tienen densidades de 2 a 2.3 g/cm<sup>3</sup>, su resistencia a la compresión es baja en las calizas y pedernales (263 y 294 kg/cm<sup>2</sup>) y muy baja en las areniscas (114 kg/cm<sup>2</sup>); los módulos de elasticidad estáticos indican que las calizas son de moderada dureza (332,000 kg/cm<sup>2</sup>), los pedernales son blandos (83,000 kg/cm<sup>2</sup>) y las areniscas muy blandas (4,500 kg/cm<sup>2</sup>); las velocidades longitudinales de los pedernales y calizas son de una roca compacta (3,084 a 3,445 m/s) disminuyendo la calidad en las areniscas (2,300 m/s).

### - Comportamiento Mecánico para la Presa.

Estas unidades litológicas son importantes por los problemas de inestabilidad que pueden ocasionar, ya que el fuerte porcentaje de limos y arcillas (40%) disminuye la resistencia de la masa rocosa. Sin embargo, las rocas duras le llevan a elevar ligeramente su resistencia por sus buenas características mecánicas.

En esta unidad se temía la presencia de bentonita que podría causar expansiones anormales que llegaran a provocar grandes deslizamientos; sin embargo, de este estudio se concluye que el tipo de arcillas presentes son las illitas en un 75% y las montmorillonitas solo en un 8%, que son las más peligrosas, por lo que se estima que no se producirán expansiones mayores de 1 kg/cm<sup>2</sup>; y además esta expansión se disipara en las fracturas de las rocas compactas.

## UNIDAD FLUVIAL (UIIb)

### - Litología.

Areniscas y areniscas conglomeráticas con abundante material volcánico, compactas y cementadas, presentan estratificación cruzada y graduada, así como estructuras de corte y relleno; presentan un intemperismo de moderado a ligero, en menor cantidad hay pedernales y calizas compactas, de baja dureza y con ligero intemperismo. Existen también horizontes de limos arenosos.

### - Discontinuidades.

Los espesores de las capas varían de moderados (areniscas) a pequeños (pedernales y calizas) las fracturas menores solo afectan a las rocas compactas con las mismas características que las Unidades UIIa y c.

### - Variaciones.

En esta unidad hay una notable variación litológica hacia la zona de la margen derecha de los Ejes 4 y 5. Aumenta el tamaño y porcentaje de los clastos, volviéndose una arenisca conglomerática, compacta, pero poco cementada. Asimismo desaparecen las capas de pedernal y calizas.

### - Propiedades Físicas y Mecánicas.

Las areniscas tienen una densidad de 2 gr/cm<sup>3</sup>; su resistencia es muy baja (145 kg/cm<sup>2</sup>) y son rocas blandas (E est = 43,000 kg/cm<sup>2</sup>), su velocidad indica que son poco compactas (Vp = 2,290 m/s).

Por su parte las calizas y pedernales tienen una resistencia muy baja (189-97 kg/cm<sup>2</sup>); sin embargo la caliza es una roca de moderada resistencia a la deformación (Es = 185,000 kg/cm<sup>2</sup>) y el pedernal es una roca frágil (Es = 75,000 kg/cm<sup>2</sup>) además de que su fuerte diferencia con el módulo dinámico (E din = 202,000 kg/cm<sup>2</sup>) indican su mala calidad. Ambas están compactas (Vp = 3486 y 4,576 m/s), respectivamente.

#### - Comportamiento Mecánico para la Presa.

Esta Unidad UIIb disminuye el peligro potencial de la inestabilidad de la Unidad II, ya que en general son materiales más compactos, resistentes y con muy poca arcilla; además separa a las subunidades más arcillosas de la Unidad II.

#### UNIDAD III

La Unidad III se distribuye en todo el Cañón, desde una altura promedio de 40 m en las laderas y hasta por lo menos 100 m de profundidad debajo del cauce del río, ya que no se conoce su espesor total.

#### - Litología.

Arenisca pumítica masiva, color gris, textura arenosa de grano fino (60-70%) y matriz limosa (28 a 35%), sin cementarse.

Esta unidad tiene una fuerte trabazón entre sus granos, que le da una buena compacidad; sin embargo, la roca es blanda y fácilmente desgranable; presenta un moderado grado de intemperismo.

#### - Discontinuidades.

La unidad esta practicamente masiva. Las escasas fracturas que presenta se agrupan en un sistema principal y dos secundarios y varias dispersas; sus espaciamentos en todas son muy amplios; son subcontinuas con una longitud entre 3 y 30 m, la mayoría abiertas (1-3 cm) y rellenas de arcilla (61%) o sílice (35%); sus planos son ondulados y rugosos.

#### - Variaciones.

Megascópicamente la Unidad III no presenta fuertes variaciones en sus características petrográficas, texturales, estructurales y de compacidad.

Sin embargo, como se verá adelante en sus propiedades mecánicas si ha, variaciones a lo largo del Cañón y a profundidad.

### - Propiedades Físicas y Mecánicas.

La densidad de las areniscas es baja (1.77 kg/cm<sup>3</sup>) por su contenido pumítico.

Su resistencia a la compresión es muy baja (7.5 a 59 kg/cm<sup>2</sup>) y sus módulos de elasticidad dan una roca muy blanda ( $E_s = 4,000$  kg/cm<sup>2</sup>) y  $E_{din} = 266,000$  kg/cm<sup>2</sup>) y su fuerte diferencia del estático y dinámico indican una mala calidad de la roca, así como sus bajas velocidades de onda primaria (1346).

Los resultados de las pruebas realizadas a los núcleos del barreno 1, Eje 5, no muestran una diferencia notable en los rangos de las propiedades; solamente se aprecia que no hay un aumento gradual de los valores de ellas a profundidad.

### - Comportamiento Mecánico para la Presa.

El comportamiento mecánico de esta unidad es problemático, ya que la baja resistencia y lo deformable del material en los primeros metros, requerirá una remoción o tratamiento del material.

Sin embargo, el mayor problema puede ser la tufificación, ya que las características del material en cuanto a su nula cementación, tamaño de arena fina y uniforme y finos limosos, así como la baja densidad de los granos de pómez favorecen a este proceso.

Por otra parte, los resultados de las pruebas de permeabilidad Lugeon indican que la roca no soporta fuertes presiones puntuales de agua en sus primeros 35 m y en algunas zonas a mayor profundidad.

## 6.2 CONCLUSIONES DEL PROBLEMA I (Estabilidad).

### - Información de Derrumbes Antiguos.

Una de las conclusiones importantes sobre el problema de estabilidad de los taludes del cañón es el hecho de no existir evidencias de antiguos deslizamientos de gran magnitud; puede decirse que solamente en la margen izquierda del Eje 4 se determinó un deslizamiento grande de materiales de la Unidad II, que se manifiesta básicamente por la forma típica de media luna de la ladera y las fuertes acumulaciones de material al pie de los escarpes.

Sin embargo, fuera de ese posible deslizamiento, solo hay una serie de derrumbes locales propiciados por la facilidad para erosionarse de los materiales de las Unidades II y III y que se acumulan sobre los taludes; generalmente son franjas estrechas perpendiculares al río o bien distribuidos en las zonas bajas de los taludes (ver capítulo 5.4).

Por último, en los sitios donde se presenta el derrame andesítico se encuentran bloques de roca de diversos tamaños en los materiales de talud; esto es ocasionado por los sistemas de fracturamiento del macizo rocoso que provocan la formación de bloques inestables que caen por volutas.

#### - Expansibilidad de las Arcillas.

Una de las incógnitas principales de este trabajo fue el definir las características de las arcillas para conocer su posibilidad de expansión; los resultados del estudio geológico que permitieron obtener importantes conclusiones son:

- Las unidades litológicas con presencia de arcillas son las UIIa y UIIc, que representan el 30% de la Unidad II. En ellas las arcillas se encuentran en porcentajes del 30 al 50% e intercaladas con rocas compactas, resistentes y fracturadas. El espesor de las capas varía entre 10 y 140 cm. con un promedio de 30 cm.
- Los tipos y porcentajes promedios de minerales arcillosos presentes en estas unidades son: Illita (25%) y Montmorillonita (8%). Además está mezclada con cuarzo (31%), calcita (20%) y otros minerales accesorios (albita y limolita).

Estos datos permiten concluir que la presencia de arcillas es más reducida de lo que se consideraba y se tiene localizada su distribución a lo largo del cañón, además sus espesores son pequeños e irregulares intercalados con rocas compactas; todo esto tiende a minimizar el Efecto Negativo para la Estabilidad.

Por otro lado, se concluye que los porcentajes de arcilla de tipo expandible como lo es la montmorillonita son bajos, por lo que se considera que las presiones que se podrían generar con el aumento de humedad serán menores de 1 kg/cm<sup>2</sup>; además de que estos delgados estratos de arcilla se encuentran empaquetados por calizas y pedernales fracturados, por donde se liberarán las presiones. Por estas razones no se incluyó la presión de expansión en los análisis de estabilidad de taludes.

Sin embargo, para una etapa de estudios de detalle se considera conveniente llevar a cabo un programa de pruebas de laboratorio que permitan determinar cuantitativamente el potencial de hinchamiento de las arcillas. Las pruebas recomendadas serían: la prueba de hinchamiento libre y la de presión de hinchamiento. Asimismo, sería recomendable conocer algunas de las propiedades físicas de las arcillas, como la plasticidad, ya que autores como Skempton (1944) han encontrado que el potencial inherente al hinchamiento depende del índice de plasticidad del material.

### 6.3 CONCLUSIONES DEL PROBLEMA II (Tubificación).

El problema de tubificación es un riesgo muy difícil de ser evaluado cuantitativamente; ya que se requiere un buen conocimiento de la red de flujo y los gradientes hidráulicos, de acuerdo con el tipo y dimensiones de la cortina, así como de las características físicas de los materiales en la cimentación.

En esta etapa de estudio no se cuenta con suficiente información para determinar cuantitativamente este riesgo, por lo que las conclusiones son solo cualitativas.

De acuerdo a las características de las areniscas de la Unidad III, se considera al material como susceptible de ser tubificado, ya que son arenas de tipo pumítico, débilmente cementadas, aunque con buena trabazón de sus granos, poco resistentes y formado por arenas uniformes (60-70%) de grano fino y en menor proporción limos (28-35%), además de ser pumíticos son ligeros (1.77 gr/cm<sup>3</sup>), resultando particularmente afectados por el flujo del agua.

Por otra parte, los resultados generales de las pruebas de permeabilidad indican a la Unidad III como poco permeable; sin embargo, el hecho de no resistir fuertes presiones (6 kg/cm<sup>2</sup>) en un espesor promedio de hasta 30 m, indican que la resistencia de las areniscas bajo una presión puntual de agua es baja, lo cual podría facilitar la tubificación en los primeros metros de material.

También puede observarse en las gráficas de las Figuras 5.7 y 5.8 que existen variaciones en los valores de permeabilidad que podrían ocasionar concentraciones de flujo peligrosas para la tubificación.

Los resultados de las pruebas físicas y mecánicas indican que existen variaciones significativas (hasta 5 veces) de un sitio a otro del cañón y a profundidad, en donde se aprecia que no hay un aumento gradual importante en sus propiedades (por lo menos hasta 100 m).

Por otro lado, los valores de resistencia a la compresión simple y módulos de elasticidad de las muestras de roca indican una mala calidad de la roca al someterse a presiones; sin considerar el efecto de confinamiento.

Como puede apreciarse es aún incierto el riesgo de tubificación ya que no hay posibilidad de hacer una evaluación cuantitativa con la información recabada hasta este momento. Por lo tanto, para tener mas datos para analizar el programa se recomienda que en las exploraciones directas, que en breve realizara la S.A.R.H., se contemple lo siguiente:

- Realizar preferentemente pruebas de permeabilidad Lefranc en todos los sondeos que se realicen, en tramos de 5 m y a lo largo de todo el barreno. Sería muy conveniente llevar a cabo también pruebas Lugeon en todos los tramos de los barrenos, con el objeto de comparar resultados.
- En las pruebas Lefranc se recomienda medir en cada tramo la permeabilidad horizontal ( $K_h$ ) y vertical ( $K_v$ ).
- En los ensayos Lugeon sería conveniente realizar pruebas para conocer la causa por la que no es posible levantar presión y determinar si la falla ocurre en la zona de los obturadores; para lograr esto debe observarse cuidadosamente los retornos del agua en el brocal y, posiblemente, aumentar lo más posible el gasto para observar estos retornos; también deberá verificarse en cada prueba si el obturador se afloja o no.
- Es conveniente realizar cuando menos tres perforaciones en un eje, una en cada margen y otra cerca del cauce, para observar variaciones laterales.
- A los núcleos de roca obtenidos deberán practicarse pruebas de laboratorio para obtener sus propiedades índice y mecánicas, sería recomendable una muestra por tramo de permeabilidad. Las pruebas serían:
  - Densidad
  - Contenido de agua natural
  - Límites de Atterberg
  - Peso específico de sólidos
  - Resistencia a la Compresión Simple
  - Módulos de elasticidad estáticos y dinámicos
  - Ensayos de percolación (Resendiz, 1975 p.527)
  - Permeabilidad al agua
- Sería también recomendable realizar a estas perforaciones los registros geofísicos que se llevaron a cabo en el barreno 7, con la finalidad de correlacionar esta información.

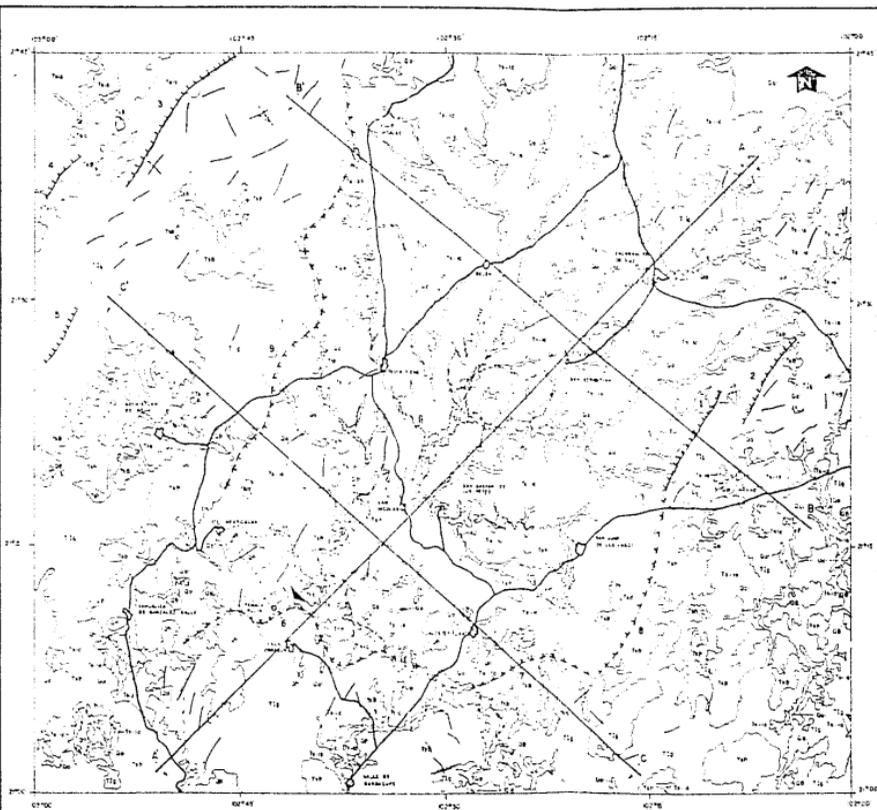
## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ C. M., 1956, Informe Preliminar acerca de las Condiciones Geológicas del sitio inferior de "La Zurda", Rio Verde, Jalisco. Informe. SARH.
- ATTEWELL, F. B. Y FARMER, I. W., 1979, Principles of Engineering Geology, John Wiley and Sons, New York, 1035 pp.
- BELL F. G., 1980, Engineering Geology and Geotechnics. Newnes - Butterworth, London - Boston, 497 pp.
- BONILLA M. G., 1970, Surface Faulting and Related Effects, in Earthquake Engineering Ch. 3 Prentice Hall, pp. 47-74.
- BROWN E. T., 1981, Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. International Society of Rock Mechanics. Pergamon Press.
- CAMPBELL K. W., 1981, Near Attenuation of Peak Horizontal Acceleration Bull. Seismol. Soc. Ame. Vol. 71, No. 6, pp. 2039-2070.
- CHOWDHURY R. N., 1978, Slope Analysis Developments in Geotech. Engng. Vol. 22, EISEVIER S.P. Co., New York, 423 pp.
- DEERE, D. U., Y MILLER, 1966, Engineering classification and index properties for intact rock. Tech Rept. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Ltd Kirland Air Force Base, New Mexico.
- DE LA O. CARREÑO ALFONSO, Julio 1955, Condiciones Geológicas de la Boquilla de la Zurda, sobre el Rio Verde, Edo. de Jalisco Informe, SARH.
- DEMANT A., Y ROBIN C., 1976, Las Fases del Vulcanismo en México: una síntesis en relación con la evolución Geodinámica desde el Cretácico. Revista Inst. Geología, UNAM, 75(1) pp. 70-83.
- DEMANT ALAIN, 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. UNAM, Inst. Geol. Revista 2, pp. 173-187.
- DEMANT ALAIN, 1979, Vulcanología y Petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico. UNAM, Inst. Geol. Revista 3, pp. 39-57.

- ESCOBAR M. J., 1974, Informe Geológico Adicional sobre el resultado de las exploraciones y pruebas de permeabilidad en la Boquilla del Proyecto "La Zurda" sobre la Barranca del Rio Verde. Moib. de Villa Alvaro Obregon, Edo. de Jalisco. Querétaro, Informe SARH.
- EXYCO, S. A., 1985. Estudio Fotogeológico, Geológico e Integración Geológico-Geofísica del Proyecto La Zurda, Rio Verde, Jal. Elaborado para la SARH.
- FIGUEROA A. J., 1970, Catalogo de Sismos ocurridos en la República Mexicana, Instituto de Ingenieria, UNAM.
- FIGUEROA A. J., 1959, Carta Sísmica de la República Mexicana, Anales del Instituto de Geofísica. Servicio Sismológico, UNAM, Vol. 5, p. 45.
- GARCIA HERRERA C., 1985, Reunión de trabajo de las oficinas de la Representación en Guadalajara, Jal., Informe SARH.
- HERNANDEZ C., J.L., 1979, Geología de la Región Central de Aguascalientes, Ags., Tesis Profesional, Fac. Ing., UNAM.
- HERREERA CEDILLO J.L., 1983 Estudio Geológico Regional de la Formación Occidental del Eje Volcánico Transmexicano. Tesis Profesional, Fac. de Ing., UNAM.
- HOCK E. AND BRAY J. W., 1981, Rock Slope Engineering 3ra. Ed. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 356.
- HOLTZ W. G., AND GIBBS H. J., 1956, Engineering properties of expansive clays. Trans. ASCE, 121, pp. 641-677.
- HOSNER, G. W., 1970, Strong Ground Motion, in Earthquake Engineering, Ch. 4, Prentice Hall, pp. 75-91.
- HUANG, Y. H., 1983, Stability Analysis of Earth Slopes, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 303.
- FESDI ARFAD, 1974, Handbook of Soil Mechanics. Vol. 1, Soil physics. ELSEVIER S.P. Co. ew York, pp. 294.
- KING CH. AND FNOFF L., 1968., Stress drop in Earthquakes. Seism, Sci. Am. Bull. 58(1), pp. 249-257.
- KRYNINE, D.P. AND JUDD, W.R., 1957., Principles of Engineering Geology and Geotechnics. Mc. Graw Hill, New York, 767 pp.
- LAMBE AND WHITMAN, 1974., Mecánica de Suelos.
- LESSER, J.H., 1955., Reconocimiento Geológico de la Boquilla de "La Zurda" en el Rio Verde, afluente del Rio Santiago, Jal.. Informe SARH.
- LOPEZ, G.F., 1949, Bosquejo Geológico del Estado de Aguascalientes. Boletín Asoc. Ing. Min. Geol. Mex., p. 331.

- MANDUJANO VELAZQUEZ J. DE J., 1984, *Geología y Geotecnia del Proyecto Hidroeléctrico Ficos de Guadalajara, Jal.*, Tesis Profesional, Fac. de Ing. UNAM.
- MARSAL, J.R., 1955, Informe Preliminar sobre la Resistencia de los Materiales de la Cimentación de la Cortina Presa "La Zurda". Jal. SARH.
- MARSAL, R.J., 1960, Earth Dams in México. *Procd. 1st Panamerican Cong. on Soil Mech. and Found. Engng. Mexico*, 3, pp. 1294-1308.
- MARSAL R.J., y RESENDIZ N.O., 1975, Prosas de Tierra y Enrocamiento, Edit. Limusa, México pp. 545.
- MC. CARTHY J.W., 1977, Soil Mechanics. Mc. Graw Hill, New York. pp. 285.
- NIETO O.J.; DELGADO A., L.A. DAMON E., PAUL, 1981, Relaciones Petroológicas y Geocronológicas del Magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas. A.I.M.M.G.M. XIV Convención Nacional, Memoria.
- NIETO O.J.; DELGADO A. AND DAMON E., PAUL, 1980, Geocronologic, Petrologic and Structural Data Related to Large Morfologic Features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional. Special Volume dedicated to the Mexican Volcanic Belt.*
- OBERT, 1946, Standardized Test for Determining the Physical Props. of Mine Rocks, U.S. Bureau of Mines, Rept. Invest. 3891.
- ORTIZ F. DEL CAMPO. I., 1949, Informe acerca de las Condiciones Geológicas de la Boquilla de "La Zurda", sobre la Barranca del Rio Verde. Edo. de Jalisco, Informe SARH.
- FADILLA E., ZAMBRANO, H. Y DE LA MORA, F., 1980, Experiencias de la Construcción de un Túnel vehicular en Suelos Púmíticos. X Reunión Nal. de Mecánica de Suelos. Tomo II, Morelia, Mich. pp. 43-52.
- PECK, R.B., HANSON, N.E. AND THORNBURN, T.H., 1974, Foundation Engineering. 2a. Ed. John Wiley and Sons, New York, 320 pp.
- PHILPOTT K. G., 1970, Suction and Swelling Pressures of Certain Argillaceous Materials, M. Sc. Tesis U. of Surtham.
- SARH. 1981, Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos y Geofísicos en Acatic Tepatitlán y Arandas, Jalisco. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, SARH.
- SANDOVAL, FRANCISCO DE P., 1980, Proyecto "La Zurda", Rio Verde, Edo. de Jalisco.

- SANCEN CONTRERAS, F.J., 1964, Informe de la Recopilación y Análisis de Información acerca de las características Geológicas en el sitio de "La Zurda", sitio inferior y sitio superior, sobre la Barranca del Río Verde, Edo. de Jalisco. SARH.
- SCHUSTER R.L., AND KRIZER R.J., 1978, Landslides Analysis and Control. Special Report 176, Transportation Research, Board. National Academy of Sciences. Washington D.C., 229 pp.
- SEED, H.B., WOODWARD J., JR., AND LUNDEREN, R., 1962, Prediction of Swelling potential for compacted clays, ASCE J. Soil Mech., 86, No SM 3. pp. 53-67.
- SILVA, E.A., 1982, Informe Geológico sobre el resultado de las Exploraciones y Pruebas de Permeabilidad en la Boquilla del Proyecto "La Zurda", Eje No. 3, sobre el Río Verde, Mpio. de Villa Obregon, Edo. de Jalisco, SARH.
- SOWERS B.G., 1978, Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Editorial Limusa, México pp. 677.
- TERZAGHI, K. AND PECK R.B., 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, 2a. Ed. John Wiley and Sons, New York, pp. 703.
- WILLIAMS, H. TURNER, F.J., AND GILBERT CH. M., 1979, Petrografía. Introducción al Estudio de las Rocas en Secciones Delgadas, Editorial Ceesa, 1a. Edición en español, México, D.F.
- ZAVALA M., J.R., 1979, Bosquejo Geológico y Geotécnico de las Provincias Fisioográficas de México. Tesis Profesional, Fac. de Ingeniería, UNAM.



NOTA: ESTE PLANO ES UNA REPRODUCCION DE LA CARTA ORIGINAL  
 HECHA EN 1964 EN EL INSTITUTO GEOLOGICO NACIONAL  
 CON LAS MODIFICACIONES DE 1970.

## LEYENDA

CONTORNOS

- 01 LÍNEA ANUAL 200MS
- 02 BARRIO UNIDICION

TELEGRAMA

- 03 MONUMENTO, MARQUES COMPLETOS POR ANÁLISIS Y POR SERVICIO GEOLOGICO NACIONAL EN TIERRA, SUELO Y SUBSUELO Y LA PLANTA E INTERCALACIONES DE MATERIAS GEOLÓGICAS
- 04 TUBO Y CONDUCTOS AGUAS

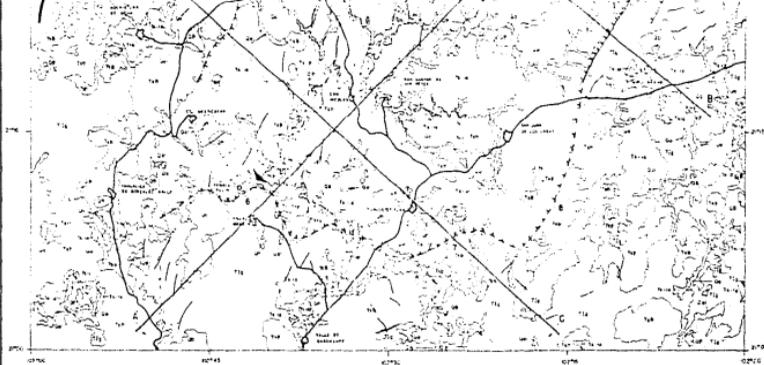
## SIMBOLOS GEOLOGICOS

- CONTACTO GEOLOGICO
- - - CONTACTO GEOLOGICO INFERIDO
- FRACCIÓN
- FALLA NORMAL
- FALLA NORMAL INFERIDA
- LÍNEA DE NECLON

## SIMBOLOS TOPOGRAFICOS

- PUEBLO
- LÍNEA FERROVIARIA
- ... TIERRACENA
- ZONA DE FRASELSE
- RIO
- CARRILLO LA ZURDA





### SIMBOLOS GEOLOGICOS

- LIMITE DE UNIDAD
- - - LIMITE DE ALGUN INTERIO
- FAULTAS
- ▬ SERRAS DE LA SIERRA
- ▲▲▲▲ TRAZA NORMAL DE UN RIO
- ← LINEA DE SECCION

### SIMBOLOS TOPOGRAFICOS

- PUNTO
- CANTONERA PERMANENTE
- TEMPORAL
- ZONA DE ENDESSE
- RIO
- ▲ CERRON LA SIERRA

NOTA: LOS PLANOS DE TAMAÑO REAL DE LA OBRERA MEDIANTE  
 1:10000, SE OBTIENEN APLICANDO LA SIGUIENTE FORMULA:  
 (Escala del plano) = (Escala del terreno) / (Escala del terreno)

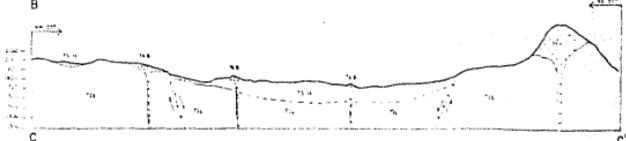
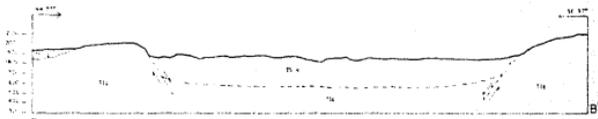
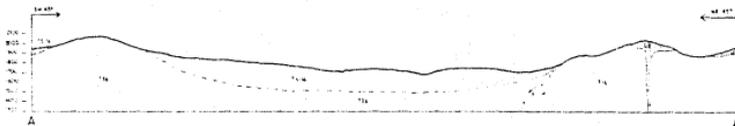


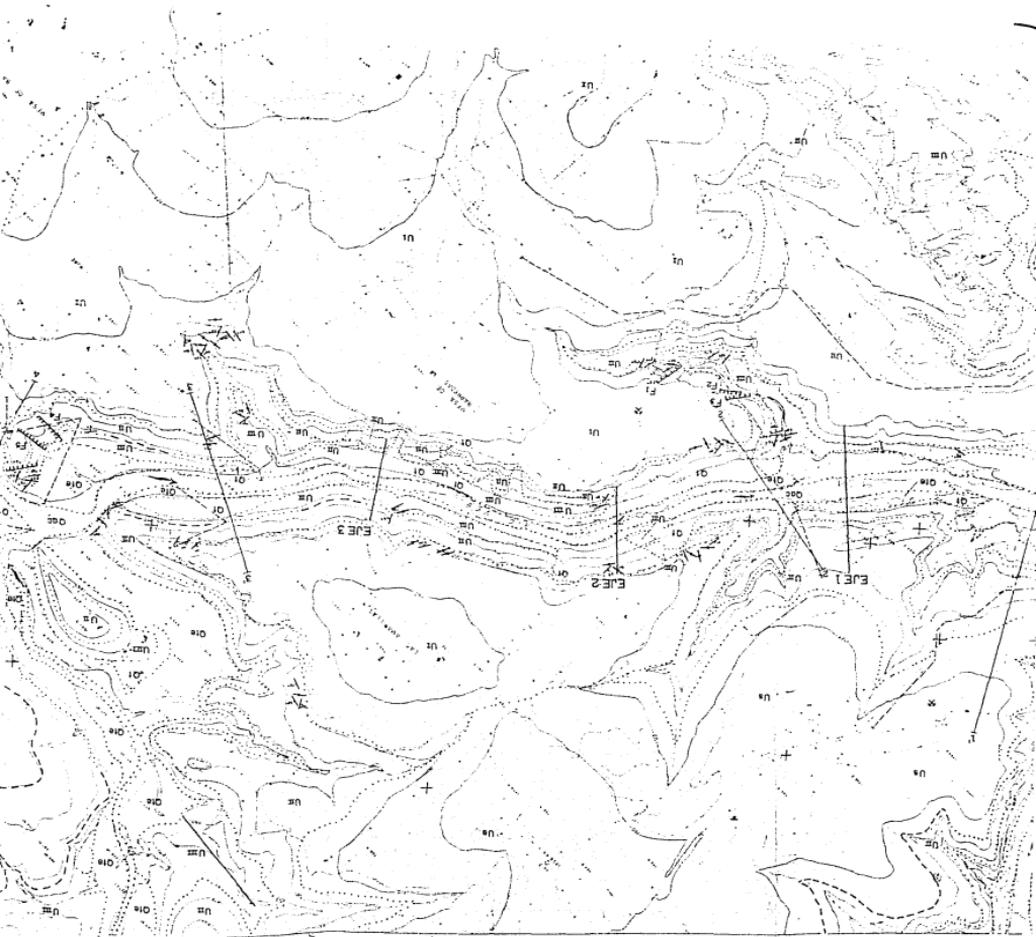
FIGURA N. 100000 10

ESTRADA: 100000 10

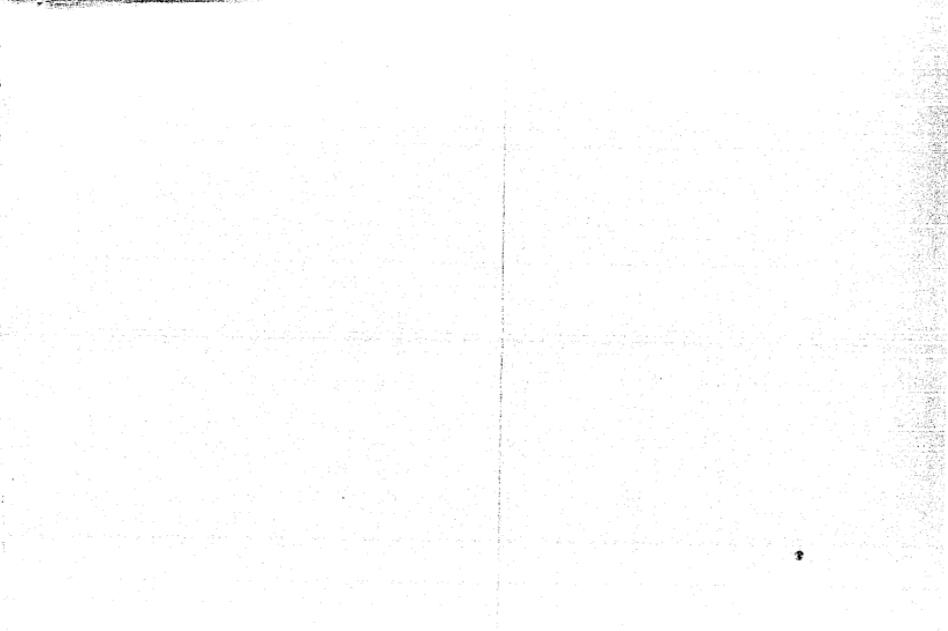
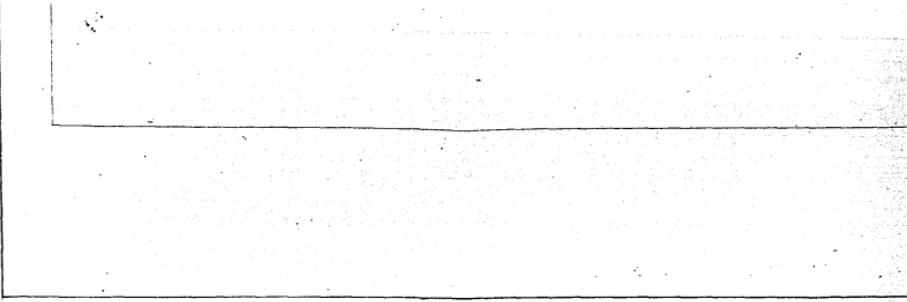


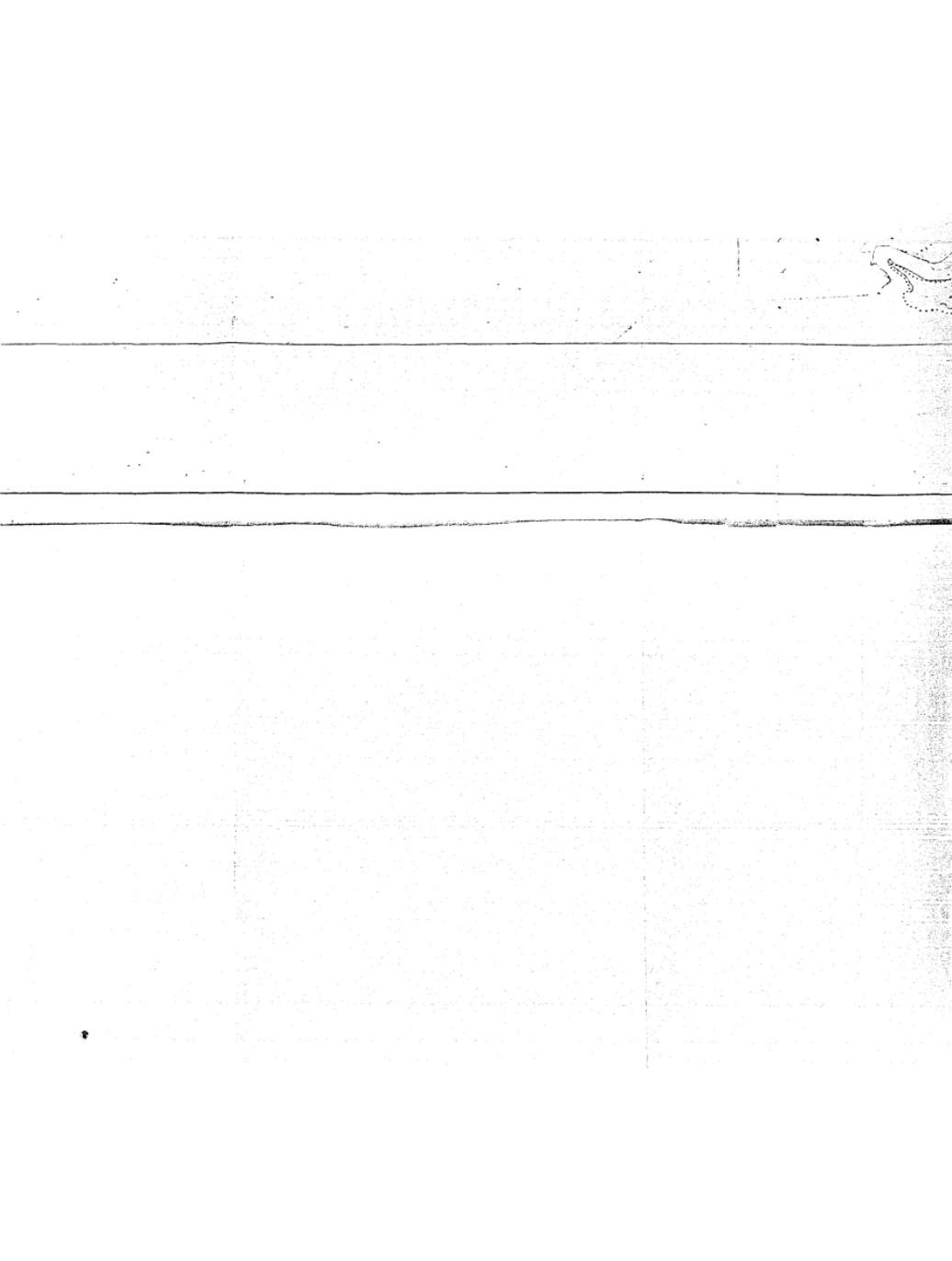
U N A M	FACULTAD DE INGENIERIA	
	TESIS PROFESIONAL	
	PLANO GEOLOGICO	
	REGIONAL	
	R. SALVADOR	MARZO 1989
	ALVAREZ PEREZ	PLANO 2.1

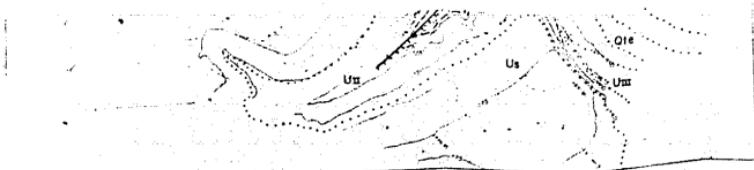












EJE 5

ESCALA GRAFICA HORIZONTAL



ESQUENTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL: 5m

NOTA: El plano fue realizado por el autor con la colaboración Regional de la Zona Centro S.A. R.M.

U  
N  
A  
M

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

PLANO GEOLOGICO DEL

CANON "LA ZURDA"

R. SALVADOR  
ALVAREZ PEREZ

MARZO DE 1989  
PLANO 4-1







