

2.25



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**"GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL VASO Y BOQUILLA DEL
P. H. ZIMAPAN, SOBRE EL RIO MOCTEZUMA,
ESTADOS DE HIDALGO Y QUERETARO"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOLOGO**

P R E S E N T A :

Virginia Rodríguez Urbina



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.

**GEOLOGIA Y GEOTECNIA DEL VASO Y BOQUILLA DEL P.H. ZIMAPAN
SOBRE EL RIO MOCTEZUMA, ESTADOS DE HIDALGO Y QUERETARO.**

T E M A R I O :

	Introducción -----	2
I	Generalidades -----	3
I.1	- Localización y vías de acceso ---	6
I.2	- Clima y vegetación -----	7
I.3	- Fisiografía e hidrografía -----	8
I.4	- Trabajos previos -----	10
II	Geología Regional -----	11
III	Estratigrafía y Tectónica -----	14
IV	Geología Histórica -----	24
V	Geotecnia en los sitios de:	
V.1	- Cortina -----	26
V.2	- Vertedor -----	38
V.3	- Obra de toma -----	41
V.4	- Embalse -----	43
VI	Bancos de materiales -----	48
VII	Riesgo Sísmico -----	50
VIII	Conclusiones y recomendaciones -----	53
	Bibliografía -----	55
	Índice de Anexos -----	58

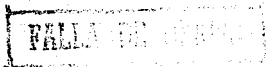
INTRODUCCION .

El abastecimiento de energía es una de las prioridades de cualquier sociedad moderna y México no es la excepción a ello, pero es además, un país que cuenta con un vasto potencial hidráulico, por lo que es factible recurrir a él como fuente de energía eléctrica, que puede ser explotada sistemáticamente mediante la construcción de presas escalonadas o en cascada, que en éste caso se alojarían a lo largo del Río Moctezuma. El primero de estos aprovechamientos escalonados en estudio, sería el Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) Zimapán, y hacia aguas abajo, probablemente, los proyectos Jilapan, El Aguacate, Chasol y Tamazunchale.

Hasta el momento, la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) ha efectuado estudios en el área del P.H. Zimapán (incluyendo la presente tesis), considerando en base a ellos, que el sitio es favorable para el emplazamiento de las obras civiles.

La cantidad instalada en el P.H. Zimapán será de 680 MW, con una generación bruta anual de 550 GWh, contándose para ello con las siguientes obras: Cortina de Concreto, Túnel de Desvío, Vertedor, Obra de Toma, Túnel de Conducción y Casa de Máquinas; además del Embalse.

Para los fines del presente trabajo se considerarán solamente los estudios geológicos y geotécnicos en las zonas de boquilla y embalse.



CAP. I. GENERALIDADES.

Los alrededores del P.H. Zimapán carecen de agua, la mayoría de los suelos son poco apropiados para fines agrícolas, además de que son severamente atacados por la erosión, ocasionada principalmente por la actividad humana, esto ha acarreado consecuencias desfavorables como son el lavado de las tierras, colapso de los vasos de almacenamiento de agua, elevación de los lechos de los ríos y esterilidad de los suelos, (Cápea-Portillo, 1990).

El pilar de la economía en el Área de Zimapán es la minería, pues se extraen minerales metálicos (Zinc, Plomo, Plata); ahí mismo existe una modesta actividad ganadera con caprinos y se concentra en las zonas más pobres, dadas sus características que les permiten adecuarse a los medios más hostiles. Hacia Rancho Nuevo existen algunos cultivos de frutales.

La construcción del P.H. Zimapán tiene como único objetivo: la generación de energía eléctrica mediante la captación de las aguas rezacas o residuales de los ríos Tula y San Juan. Se ha observado que las aguas residuales ocasionan diversos problemas, como la esterilidad del suelo al pasar del tiempo.

En el caso de los proyectos hidroeléctricos, los problemas causados por las aguas residuales suelen ocurrir tanto en la etapa de construcción como en la de operación; son de importantes consecuencias el arrastre de residuos sólidos y la acumulación de fangos, los fenómenos de corrosión en los materiales de construcción y en la maquinaria, así como los fenómenos de oxidación y la consecuente emanación de gases de carácter tóxico que afectan al trabajador y al equipo utilizado. Para evaluar el posible comportamiento de estas aguas en el P.H. Zimapán, el laboratorio del Departamento de Geohidrología de la C.I.E. propuso el muestreo periódico cada dos meses de las aguas, de abril en adelante para así conocer las variaciones que pueden presentarse en épocas de diferente precipitación pluvial. Se propone además que haya una estación de muestreo en cada río, a cierta distancia de la boquilla y otra en la confluencia de estos ríos. En lo anterior se pretenden determinar los siguientes parámetros:

- Contenido de materia orgánica: azúcares, proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, agentes tensioactivos (detergentes y jabones), fitofitos, pesticidas, herbicidas y otros productos agrícolas. Estos compuestos son importantes para determinar el establecimiento y control de la calidad del agua residual. La concentración de materia orgánica puede inferirse si el agua entra en contacto con alguna formación geológica en la que abunde materia orgánica, o si existen descargas residuales tratadas o sin tratar, de origen doméstico o industrial, además de las evaporaciones que ocurren en todos los cauces de los ríos.

- Potencial hidrógeno: pH.
- Conductancia Eléctrica: C.E.

- Alcalinidad: CO_3 , HCO_3 .
- Aniones: Cl^- , $(\text{SO}_4)^-$, $(\text{NO}_3)^-$.
- S^{2-} , $(\text{PO}_4)^{3-}$.
- Cationes: Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+ .
- Elementos tóxicos: Cu^{+2} , Pb^{+2} , Ag^+ , Cr^{+3} , As, B.
- Metales pesados: Ni, Mn, Pb, Cr, Cd, Zn, Cu, Fe, Hg.
- Gases: N_2 , O_2 , CO_2 , H_2S , NH, CH_4 , Cl_2 , O_3 , NO_2 , SO_2 .

Por otra parte, deben considerarse características biológicas tales como la identificación y cuantificación de microorganismos que permiten estimar y controlar la descomposición y estabilización de la materia orgánica y que además, sirven como indicador de laminación y también para estimar si los embalses se verán afectados por el crecimiento explosivo de algas. Los microorganismos más comunes en aguas residuales son: protistas, virus, plantas y animales coliformes.

En laboratorio se construyen modelos a escala con los materiales de construcción y empleando compósitos de agua de los ríos involucrados para observar mejor los efectos producidos por estas aguas residuales. La caracterización desde el punto de vista físico-químico se realizará con apego a las técnicas analíticas del "Standard Methods for Examination of Water and Waste Water".

TABLA I. DESCRIPCION DEL PROYECTO.

CORTINA:	Corona	1 565.00	msnm	Altitud
		1 365.00	msnm	Altitud al desplante
	Ancho (variable)	6.0 a 10.00	m	
	Altura	200.00	m	(aprox.)
	Desarrollo de la corona (longitud)	99.00	m	
	Volumen de concreto	294 000.00	m ³	
EMBALSE:	Area máxima	22.00	km ²	
	NAME	1 548.00	msnm	
	NAMO	1 544.50	msnm	
	Capacidad útil	250.00	Mm ³	
	Capacidad de azolves	330.00	Mm ³	
	Capacidad para control de avenidas	60.00	Mm ³	
	Capacidad al NAMIND	730.00	Mm ³	
	Capacidad al NAMO	1 060.00	Mm ³	
Capacidad al NAME	1 120.00	Mm ³		
VERTEDOR:	Formado por un túnel y un canal de llamada, con estructura de control formada por 3 vanos que alojan compuertas radiales.			
		M.I. (larga)	M.D.	
	Canal: ancho	20.00		m
	Túnel: diámetro	10.00	9.50	m
	longitud	610.00	860.00	m
Capacidad de gasto máx.	2 650.00		m ³ /s	
OBRA DE DESVIO:	Consta de un túnel localizado en la margen izquierda, y se complementa con 2 ataguías de materiales graduados.			
	Túnel: diámetro	9.40	m	
	longitud	602.00	m	
	pendiente	0.0:9270		
	gasto máx.	1 021.00	m ³ /s	
Ataguías:	(altura)			
	de aguas arriba	30.26	m	
	de aguas abajo	11.50	m	
OBRA DE TOMA:	Ubicada sobre la margen derecha del Río Tula, a 1 100 m al oriente del Cañón del Infiernillo, en estructura tipo lumbrera, con un nicho superior para alojar las estructuras de control, con 2 juegos de compuertas deslizantes tipo vagón, una de servicios y otra de emergencias.			
	Rejillas de:	0.31 a 12.64	m	
	Gasto de diseño	57.00	m ³ /s	
	Canal de llamada para obtener velocidades mínimas de	1.25	m/s	

Nota: El 35% del presupuesto se destinará al Túnel de Conducción, del 15 al 20% a la cortina y el resto a las obras obras.

I.1 LOCALIZACION Y VIAS DE ACCESO.

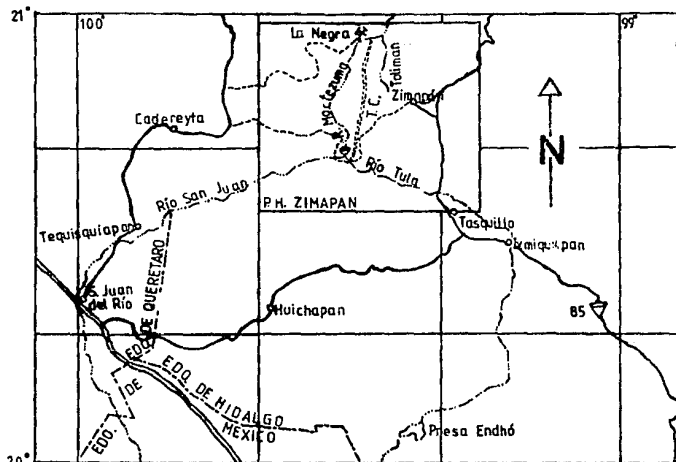
Los ríos Tula y San Juan confluyen a la entrada del Cañón del Infiernillo para formar el Río Moctezuma, sobre el cual se localiza la boquilla del P.H. Zimapán, aproximadamente a unos 350 m aguas abajo de la confluencia, y a unos 15 Km en línea recta, al SW de la Ciudad de Zimapán, Hgo. (Figura 1).

El área involucrada y estudiada para los fines del proyecto está limitada por las coordenadas 430 000 y 465 000 (UTM) de Longitud Oeste y 2 275 000 y 2 310 000 de Latitud Norte.

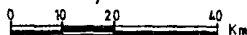
El acceso se realizaba antiguamente por la carretera San Juan del Río-Vizarrón y 13 Km adelante de Cadereyta, Oro. se tomaba la desviación oriente, siguiendo por terracería unos 34 Km hasta Vista Hermosa, donde se continuaba hacia el oriente, siguiendo por unos 3 Km el cauce del Río San Juan para llegar a la boquilla.

En el año de 1984 C.F.E. construyó un nuevo acceso: es una terracería de 32 Km que parte de Zimapán y llega a la zona de boquillas; en Rancho Nuevo se conecta al acceso original. De la terracería Zimapán-Boquilla se desprenden algunas brechas que llevan a los sitios de exploración. Se puede llegar a algunas partes de la conducción por el camino Zimapán-La Ortiga, o bien, por el camino a la Mina El Espíritu. El área de casa de máquinas y subestación tiene acceso por el Arroyo Tolimán. Es posible transitar en vehículo hasta la subida a la Mina El Espíritu y el resto del recorrido se hace a pie.

PLANO DE LOCALIZACION GEOGRAFICA



Modificado del Informe Geológico Final
P.H. Zimapán, C.F.E., 1985.



SIMBOLOGIA:

- Poblado
- Carretera
- == Autopista
- - - Límite Estatal
- ~ Arroyo o Río
- - - Terracería
- ⊙ Cortina
- ⋯ T.C.
- ⚡ Túnel de Conducción
- ⛏ Mina



Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Figura 1.

Septiembre de 1988

La Sierra Madre Oriental desempeña un importante papel en la distribución de áreas con diferente clima, tanto por los efectos de la altitud como porque constituye una barrera a los vientos húmedos del Golfo de México.

De acuerdo a la Carta de Climas consultada (1) el clima que predomina en la región es el semiseco o semiárido por su grado de humedad, y semicálido por su temperatura; el régimen de lluvias se lleva a cabo en verano, teniendo una precipitación media anual baja: 400 mm en la ciudad de Zimapán, aumenta ligeramente hacia la zona de Xahá y La Majada a 500 mm y llega a ser de 600 mm en Rancho Nuevo, por lo que el clima ahí tiene un carácter subhúmedo. La temperatura media anual es de 18°C, y el mes más caliente del año ocurre antes de Junio.

En general, la vegetación es escasa y consiste en diversas especies de agaves pero la principal es el maguey; otras plantas comunes en la región son el nopal, los cactus, la yuca y el mezquite, también existen huizaches y en algunas ocasiones pirules.

Estudios recientes efectuados por ecólogos y antropólogos han detectado la presencia de algunas especies de cactáceas y nopales muy raros, por lo que proponen una campaña para rescatarlos antes de que el agua del embalse los cubra; también se pretende salvar algunos árboles para aprovechar su madera.

Las tierras de cultivo también son escasas y de mala calidad, aprovechándose cualquier espacio para sembrar; pequeñas cañadas cubiertas de aluvión sirven para cultivar ocasionalmente maíz, maguey, frijol y un poco de jitomate y chile verde, que se destinan al consumo doméstico.

Rancho Nuevo es uno de los pocos poblados que disponen de buenas tierras, en las que se cultivan algunos frutales como la papaya, el mango, el aguacate y el higo; también se cultiva maíz. El agua del embalse cubrirá estas tierras.

(1). Carta de Climas. 140-III Querétaro. Escala 1: 500 000
CETENAL-UNAM, Enero de 1970.

FISIOGRAFIA (Fig. 2):

La Fisiografía de la zona es realmente contrastante, pues se sitúa en el límite de dos provincias: Hacia la parte norte se presenta la provincia de la Sierra Madre Oriental, de origen sedimentario, donde predominan lutitas y calizas formando estructuras con un rumbo preferencial NW-SE, que constituyen cadenas montañosas separadas por amplias depresiones topográficas paralelas, así como profundos cañones de paredes abruptas que cortan a estas cadenas en sentido perpendicular o paralelo. En esta provincia y específicamente en la Subprovincia de las Sierras Bajas (Raisz, E., 1964), quedarán alojadas las obras civiles. Los amplios valles y valles intermontanos se desarrollan en las formaciones geológicas las Trancas, Soyatal y Méndez, en tanto que los altos relieves topográficos ocurren en las resistentes rocas de la Formación El Doctor. Las principales corrientes forman amplios valles en las rocas clásticas marinas y estrechas gargantas en las calizas.

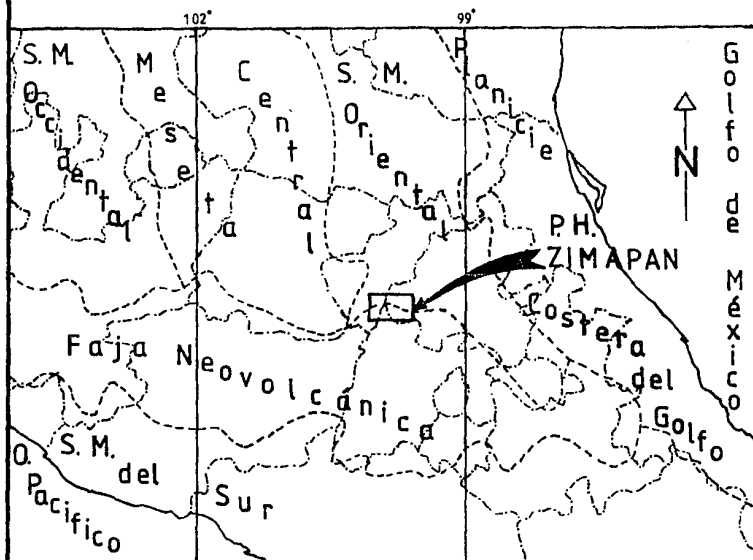
En la zona de estudio el rasgo más característico lo constituye el Cañón del Infiernillo, por donde fluye el Río Moctezuma desde sus inicios; en sus primeros 3 kilómetros presenta paredes sensiblemente verticales, después las laderas del río se suavizan, con pequeños encañonamientos como Jiliapan y Aguacate hasta la población de Tamazunchale, S.L.P., donde corre sobre una planicie; desde el punto de vista geomorfológico el Área se clasifica en una etapa de madurez avanzada en el ciclo propuesto por Davis (1936).

La altitud promedio es de 1 800 m, aunque sobrepasen el Cerro Los Lirios (2 300 m), el Cerro la Laja (3 100 m), en tanto que la cota más baja se localiza sobre el Río Moctezuma a los 1 100 m en el Área de la subestación, existiendo por tanto, un desnivel máximo de 2 000 m. En general, la altitud del terreno disminuye hacia el norte (hacia la Huasteca).

Hacia la parte sur y colindando con la Sierra Madre Oriental se tiene la provincia fisiográfica del Altiplano Neovolcánico, que corresponde con la provincia geológica del Eje Neovolcánico Transmexicano, cuyo límite en esta zona está marcado por los cauces de los ríos Tula y San Juan; precisamente sobre esos cauces se alojará el embalse de la presa.

El Altiplano Neovolcánico está constituida principalmente de rocas ígneas extrusivas de diversa composición, ya que existe vulcanismo básico y son abundantes los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica, observándose también numerosas unidades dacíticas y adriodacíticas (Morán, Z., D.J. 1985). Estas rocas forman las elevaciones montañosas ya sea aisladas, en cadenas o en sistemas, alternando con planicies acumulativas, volcánicas, lacustres o fluviales (Lugo Hubp, J.I., 1986). Entre los rasgos sobresalientes del Eje Neovolcánico Transmexicano están los estratovolcanes, los conos cónicos generalmente pequeños y las calderas (las más cercanas al Área son las de Amalco y Huichapan) ya sea de colapso o

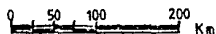
UBICACION FISIOGRAFICA



Amplificado de Raisz, E., 1964.

SIMBOLOGIA:

- Límite estatal
- - - - Límite entre provincias fisiográficas
- Área de estudio



Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Figura 2.

Septiembre de 1988

explosión.

A veces la geomorfología que se observa es de lomeríos de pendientes suaves y convexas con algunas cañadas. La mayoría de estas rocas se presenta en su posición original de acumulación y en menor grado afectadas por fallas. Este conjunto de rocas volcánicas dió origen a la topografía escalonada de la región.

De acuerdo con la Carta Fisiográfica de la Secretaría de Programación y Presupuesto (S.P.P.), 1981, los rasgos descritos corresponden a la subprovincia de Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo.

HIDROGRAFIA:

El sistema del Río Moctezuma pertenece a la cuenca del Río Pánuco, y éste, a su vez, a la vertiente del Golfo de México. Para los fines del proyecto se estudió un área de 500 km² en los estados de Querétaro e Hidalgo; el Río Moctezuma nace en la confluencia de los ríos Tula y San Juan que tienen un gasto promedio de 20 m³/s y 2 m³/s respectivamente, medidos en estaciones hidrométricas cercanas a dicha confluencia. Al Río Tula lo alimentan las aguas negras de la Ciudad de México a través del Tajo de Nochistongo y aguas abajo recibe la afluencia del Río Actopan, prosiguiendo su curso hacia el norte hasta llegar al Río San Juan.

Palacios Nieto, H., (1982) proporciona los siguientes valores del escurrimiento medio anual, para los ríos:

Tula	-----	450 millones de m ³
San Juan	-----	50 millones de m ³

La red de drenaje está totalmente integrada, predominando los tipos rectangular, subrectangular, dendrítico y localmente dendrítico subparalelo y plumado (1). Los controles del avenamiento son principalmente estructurales y estratigráficos, como el cauce del Río Moctezuma labrado por erosión de una fractura en rocas calizas; los cauces de los ríos Tula y San Juan también siguen, parcialmente, un alineamiento estructural que corresponde a la traza de la Falla Tula. La red de drenaje es más cerrada en las capas de rocas detríticas marinas, mientras que tiende a ser más espaciada en las calizas.

Vale la pena mencionar que el estado de Hidalgo cuenta con pocas presas de importancia y son las siguientes: Endhó, Requena, Omitémetl y Tejocotal. Por su parte, las presas de esta región en el estado de Querétaro son las del Engrudo, de la Estancia, de San Ildefonso, de Ajuchitancita y el sistema de riego de San Juan del Río, (López-Portillo, 1980?).

La energía generada en el P.H. Zimapán será integrada a la red eléctrica nacional y cuenta con la ventaja adicional de encontrarse muy cerca de los grandes centros de consumo.

(1). Según el Informe Geológico Final, C.F.E., 1985.

I.4 TRABAJOS PREVIOS.

La región de Zimapán ha basado su economía en la industria minera desde hace varios siglos y por esa razón existe una gran cantidad de trabajos geológicos enfocados a esa actividad; de los más conocidos por su buena realización son los de Simmons, F.S. y Mapes, V.E. (1956), Segerstrom K. (1962), Lesser (1970), Quintus (1972), Restovic, P.I. (1973), y Aguilar (1973).

La complejidad geológico-estructural de la zona es por sí misma motivo suficiente de estudio, como lo muestran los trabajos de Wilson et. al. (1955), Gaytán Rueda, J.E. (1975), Suter, H., (1980,81), Carrillo, M. y Suter, M. (1982).

No pueden pasar desapercibidos los trabajos petroleros de Velázquez y Palazuelos (1976), Becerra, H.S. (1982), Longoria, F.J., (1982).

Y a partir de 1980, la C.F.E. empezó a realizar estudios geotécnicos utilizando fotogrametría escala 1: 50 000 de DETFNAI y 1: 5 000 de EYSPSA, haciendo la cartografía de detalle requerida, estudios petrográficos, geofísicos y de mecánica de rocas, entre otros.

En resumen, los trabajos geológicos del Área están fundamentalmente enfocados a la minería, y solamente durante los últimos años a fenómenos tectónicos y estudios de ingeniería geológica.

CAP. II GEOLOGIA REGIONAL (Plano I)

La geología que se presenta en el área de estudio es relativamente compleja. Afloran rocas marinas mesozoicas intensamente deformadas y afalladas, cuya edad varía desde el Jurásico Superior en la Formación Las Trancas hasta el Turoniano Tardío-Campaniano en la Formación Soyatal. Este paquete sedimentario está cubierto discordantemente por rocas ígneas extrusivas del Terciario con una composición muy variable: basáltica, andesítica y aún ácida, formando cuerpos de tobas arenosas y tobas soldadas intercaladas con derrames, aglomerados y brechas.

Una gran cantidad de cuerpos intrusivos de diversa composición: cuarzo-monzonita con facies dioríticas y sieníticas, pórfido de latita, cuerpos menores de diabases augíticas y pórfidos riolíticos se emplazaron en forma de stocks o diques, en varios episodios que van del Paleoceno Tardío (20-12.5 m.a.) al Oligoceno, (Arteaga, S. y L.T., 1982, en C.F.E., 1985).

El contacto de estos cuerpos, sobre todo de la cuarzo-monzonita, con las rocas calcáreas y carboníferas dio lugar a la formación de skarns y rocas de tipo filoniano donde se ubican las zonas de mineralización de mayor importancia.

A pesar de su amplia distribución, las dimensiones de estos diques son reducidas para su representación a la escala de este trabajo.

Existen también depósitos fluviales y suelos residuales, producto de los procesos denudatorios, que aumentan la ya variada litología de la zona.

Por otra parte, el aspecto estructural también es complejo. El trabajo geológico detallado de carácter estructural de Carrillo, M. y Sufer, M., (1982), se refiere a la zona ubicada sobre el paralelo 21° N, como el Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental.

Se tienen numerosas fallas normales e inversas cuya traza se puede seguir por varios kilómetros, además de una gran cantidad de fallas pequeñas. Las fallas principales aparecen en tres grupos que se describen de acuerdo a los datos obtenidos del Informe Geológico final, C.F.E., (1985):

a) Fallas Normales, de orientación Este-Oeste, con su bloque de piso situado al sur.

-FALLA DEL RÍO NOCTEZUMA I (No. 11). Localizada cerca de la salida del Río Noctezuma hacia el Valle de Maconí, su salto es de más de 300 m y su longitud sobrepasa los 15 km. Afecta parcialmente a la Falla El Doctor. Podría estar asociada a focos sísmicos.

-FALLA TULA (No. III). Muy importante por localizarse cerca del Área de la boquilla. Su longitud es de unos 7 km. y B.W. Wilson, (1953, 54, en C.F.E., 1983) le calcula un salto de 700 m en el Área de la boquilla y de 200 m hacia el Oeste, y las exploraciones efectuadas para el proyecto confirman lo anterior puesto que al suar la topografía y la longitud de barrenación se han medido 470 m sin hallar el contacto Soyatal-El Doctor. El plano de falla tiene una inclinación variable entre 42° y 50°. La falla se considera inactiva porque en el área de la boquilla la traza se encuentra cubierta por depósitos de fanglomerado disectados.

-FALLA EL MALACATE (No. IV). Su traza fué bien reconocida por Simmons y Mapes (1956) al oriente del Área; sin embargo, hacia la zona de la conducción es difícil de observar porque afecta exclusivamente a la Formación Soyatal. Su salto se considera de aproximadamente 300 m y se estima que es menor hacia la zona de la conducción.

-FALLA MOCTEZUMA II (No. VIII). Se localiza 2 km aguas arriba de la Falla Moctezuma I y afecta exclusivamente a la Formación El Doctor y hacia el oriente se cruza con la Moctezuma I. Esta falla está asociada a yacimientos minerales en los alrededores del Detzani.

-FALLA EL CAJON (No. XIII). Es subsidiaria de la Falla Tula y también se encuentra cerca del Área de boquillas, su salto es de unos 70 m, su traza es cóncava y su buzamiento muy variable, desde 12° a 60°. (Esta falla no aparece en el Plano I).

-FALLA No. XIV. Forma parte del conjunto de fallas que se localizan a la entrada del Cañón del Infiernillo. Son dos fallas con trazas paralelas a la Falla El Cajón, con salto de 20 a 30 m. Ambas son inactivas. (Tampoco aparece en el Plano I).

-FALLA LA FLORIDA. (No. X). Se localiza siguiendo el curso del Río Tula, su orientación, grosso modo, es WNW-ESE. Su traza tiene unos 18 km de longitud; su salto es indeterminado, pero se considera del mismo orden de magnitud que el de la Falla Tula. Parece ser que afecta, inclusive, a los basaltos Plio-cuaternarios y pudiera estar asociada a focos sísmicos.

b) Fallas normales de orientación NW-SE, con su bloque de piso situado al SW.

-FALLA DE TALUD (No. V). Ubicada 3.5 km al norte del Área de boquillas en la margen derecha del Río Moctezuma, su longitud es de casi 4 km y afecta exclusivamente a la Formación El Doctor. Se le considera inactiva y parece ser que es el reflejo de una falla mayor con un salto superior a los 200 m.

-FALLA DEL ARENAL (No. VI). Localizada a unos 100 m del Área propuesta para la obra de toma del proyecto, la traza está claramente expuesta en el área cercana al portal de entrada, poniendo en contacto las facies dolomíticas y brechoides con las facies micriticas de la Formación El Doctor. El plano de falla se inclina al noreste y es

cercano a la vertical. Se considera inactiva. Se ha cartografiado una longitud de 600 m aunque pudiera ser de 2.5 km.

-FALLA DE SANCILLO (No. VII). Se localiza aproximadamente a 3.5 km al NE del Área de bocuillas, la traza se infiere de la actitud de las capas, afecta principalmente al material volcánico; se le calcula una longitud de 4.3 km. Se considera inactiva.

-FALLA LA LAJA (No. XII). Ubicada al SE del Cerro La Laja. La longitud mínima cartografiada es de 9.5 km, afecta exclusivamente a la Formación El Doctor, su traza está parcialmente cubierta por basaltos del Terciario Superior. Podría estar relacionada con focos sísmicos.

c) Fallas inversas o cabalgaduras.

-FALLA EL DOCTOR (No. I). Es uno de los rasgos más prominentes del área. Se formó por eventos compresionales que ocasionaron el cabalgamiento de la Formación El Doctor sobre las formaciones Soyatal y Méndez. Posteriormente la región se vio afectada por esfuerzos tensionales que actuaron solamente en algunas partes, ocultando la falla inversa original. Al frente de la cabalgadura la inclinación es de 28°; en el afloramiento que se expone frente al dique Pozo Hondo tiene una inclinación de 23° al SW, suavizándose hasta ser casi horizontal; en el Cañón del Infiernillo aflora en ambos márgenes del Río Moctezuma, observando una tendencia contraria a la del frente de la cabalgadura, con una inclinación de 17° al NE.

-FALLA DAXHI (No. IX). Localizada al norte del cerro del mismo nombre, también es una cabalgadura de la Formación El Doctor sobre la Formación Soyatal. Su longitud cartografiada es de 4.5 km. Se considera inactiva porque tanto al oriente como al poniente está cubierta por material volcánico y depósitos recientes. Carrillo, M. y Suter, M., (1982), consideran a la Falla Daxhi como una continuación de la Cabalgadura El Doctor.

En lo que respecta a los grandes plegamientos característicos de esta región, pueden enumerarse como los más importantes los siguientes: Sinclinal de San Lorenzo (ocultado de la cabalgadura de Hiquerillas), Sinclinal de Maconí, Anticlinorio de El Pirón, Sinclinal de El Aguacate, Anticlinal de Bonanza, Sinclinal de El Fraile, de los cuales solamente el Sinclinal de Maconí, El Sinclinal de El Aguacate y el Anticlinal de Bonanza, aparecen en el Plano I.

Las rocas más antiguas que afloran en el Área son las de la Formación Las Trancas; sin embargo, en el Anticlinorio de Huayacocotla, ubicado unos 70 km al nororiente de Zimapan, se conocen rocas de mayor antigüedad, pues Carrillo, M. y Suter, M., (1982), mencionan a la Formación Huiznopala como la más antigua e interpretan su litología (gneiss blastomilonítico) como un basamento cristalino continental, al que le asignan una edad probable del Precámbrico.

Carrillo, M. y Suter, M. (1982) y Longoria F.J., (1984), coinciden en que:

La Formación Guacamaya es un depósito flysch de edad Permiano-carbonífera que aflora en el Cañón de Peregrina. La Formación Huizachal formada por areniscas del Triásico-Jurásico dispuestas en capas y conocidas por su coloración como capas rojas continentales, sus restos de plantas fósiles permiten asignarlas al Rhaetiano; representan el relleno de grabens por depósitos aluviales. La Formación Huayacocotla, constituida por lutitas y areniscas del Jurásico Inferior contiene asociaciones de ammonites indicativas del Sinemuriano. La secuencia de lechos rojos de la Formación Cahuasas marca la transición del Jurásico Inferior marino y la transgresión regional del Jurásico Medio.

Hacia la Mesa Central, en las áreas de Coapas y Zacatecas, y más al Oeste, en Guanajuato; afloran rocas esquistosas de probable edad Paleozoico Superior o Triásico Inferior, Morán, Z., D.J., (1984). En el área de Zacatecas esas rocas están cubiertas por una secuencia de rocas sedimentarias marinas parcialmente metamorizadas, con fósiles del Triásico Superior, (Burckhardt, 1970 en Morán, Z., op. cit.). Estas últimas rocas, junto con las de Peñón Blanco y Charcas, S.L.P. constituyen los únicos afloramientos reconocidos del Triásico marino en esta porción de México.

Esta columna de rocas anteriores a la Formación Las Trancas no puede extrapolarse con certeza al Área de Zimapan puesto que los eventos tectónicos y la erosión impidieron una distribución uniforme de dichas rocas. Los datos de estratigrafía mencionados antes se incluyeron aquí porque son los más cercanos al Área que se conocen.

A continuación se describe la secuencia estratigráfica que aflora en la región de Zimapan:

Formación Las Trancas.

Fue definida por Segerstrom, K., (1962) cerca del Puerto de Las Trancas (km 217 carretera México-Laredo), donde aflora parte de esta secuencia, incluyendo su contacto superior. No se conoce la base de la secuencia, lo que dificulta, aún más, la interpretación de los acontecimientos geológicos previos a su depósito. La secuencia está formada por lutitas calcáreas color gris oscuro, limolites, calizas micríticas, parcialmente con pirita, así como cantidades menores de

grauvacas y pedernal.

En la Barranca de Tolimán, unos 20 km al WNW del Puerto de Las Trancas aflora una sección de aproximadamente 350 m en donde se presentan lutitas con nódulos de pirita, intercalaciones de grauvacas, limolitas y lutitas calcáreas y localmente niveles conglomeráticos.

De lo anterior, pueden definirse dos zonas bien diferenciadas dentro de esta formación:

Una zona oriental, que es además la parte superior de la secuencia, donde predominan las rocas carbonatadas, presentándose calizas micriticas, margas y lutitas calcáreas ligeramente apizarradas interestratificadas con capas delgadas de lutitas apizarradas. Hacia abajo, la secuencia cambia a lutitas y limolitas, alternándose rítmicamente con capas delgadas de calizas micriticas, ocasionalmente con bancos de areniscas y rocas piroclásticas; en la falda del Cerro Los Pirios, Carrillo, M. y Suter, M., (1982), han calculado un espesor de 800 m para esta parte de la secuencia; cuya composición litológica se refleja en una mayor competencia estructural en relación con la parte inferior.

Una zona occidental, que corresponde a la parte inferior de la secuencia, en donde predominan las rocas pelítico-calcáreas y disminuyen considerablemente las rocas carbonatadas y en donde son de importancia las trazas de areniscas; los estratos son poco continuos y son frecuentes los "boudins" o bloques, (Carrillo, M. y Suter, M., 1982). A nivel microscópico se distinguen dos tipos litológicos de rocas detríticas, ambos con un alto contenido de sílice: a) grauvacas pobres en líticos y b) litarenitas.

Edad: - Segerström, (1962), reportó los amonites Paradontóceras, Muzonilites y Lytoceroides, además de un apticus, asociaciones que corresponden al Kimmeridgiense Tardío y Titoniense.

- M. Miyakawa, (en Carrillo, M. y Suter, M., 1982) en base a asociaciones de microfósiles le asigna un alcance estratigráfico del Jurásico-Superior al Neocomiano.
- Carrillo, M. y Suter, M., (1982), encontraron amonitas y esporas barrémicas y hauterivienses.

Por lo tanto, la Formación Las Trancas tiene un alcance estratigráfico del Jurásico Superior (Kimmeridgiense) al Cretácico Inferior (Barrémico).

La Formación Las Trancas está cubierta por la Formación Santuario y localmente por la Formación El Doctor, (Longoria, F.J., 1984), siendo el contacto concordante y abrupto; algunos autores proponen una discordancia paralela en algunas zonas, (C.F.E., 1985).

Longoria, F.J., (1984), considera que la Formación Las Trancas formaría parte de la secuencia eugeosinclinal del Geosinclinal Mexicano.

Formación El Doctor.

Fuó definida por Wilson, et.al., (1955). Consiste de rocas carbonatadas que forman un banco de 1 500-2 000 m de espesor, que se desarrolló durante el Cretácico Medio.

Pueden distinguirse varias facies, además de otras muchas subfacies, que no se describen por no ser el objetivo de este trabajo. Wilson, et.al., (1955), definieron las cuatro facies principales en franjas paralelas orientadas al NW (y ennumeradas de SW a NE): caliza Cerro Ladrón, conglomerado El Socavón, caliza San Joaquín y caliza La Negra.

- **FACIES CERRO LADRON.** Es la más característica del banco y aflora en la zona de boquilla del P.H. Zimapán: se trata de un banco que se formó en aguas someras, como lo indica la presencia de radiolitas, a partir de lodos calcáreos litificados, de estratificación gruesa; hacia las áreas marginales presenta un conglomerado calcáreo de grano fino. Se distinguió por lo siguiente:

- a) actuó como una barrera,
- b) resistió al oleaje,
- c) está bien estratificado,
- d) no presenta una estructura formada por exoesqueletos y,
- e) tiene un lado prearrecifal de conglomerado.

Las características c) y d) no son comunes en arrecifes orgánicos.

- **FACIES EL SOCAVON.** Constituye el lado prearrecifal. Es un conglomerado de grano grueso, formado por clásticos calcáreos, principalmente de caliza onita en estratos gruesos y conglomerado de grano fino, con cantidades considerables de coquina clástica. El lugar de aporte de estos sedimentos estuvo situado al SW, a corta distancia y fue el banco Cerro Ladrón, fuertemente erosionado por acción del oleaje.

- **FACIES SAN JOAQUIN.** Se trata de una caliza oscura en estratos gruesos con abundantes nódulos de pedernal negro, que se interdigita con la facies La Negra al NE y con la facies El Socavón al SW. Parece ser que se acumuló en forma de lodos calcáreos no consolidados y pedernal gelatinoso, agitados y redepositados por la acción del oleaje; sus sedimentos son similares a los de la facies La Negra pero depositados en aguas menos profundas, sobre un fondo con inclinación suficiente para causar hundimiento y resbalamiento submarinos, como lo evidencia la presencia de pequeños pliegues sin-sedimentarios entre estratos sin perturbación.

- **FACIES LA NEGRA.** Calizas de estratificación delgada (10 a 20 cm de espesor), con pseudoestratos lenticulares de pedernal negro, de 1 a 10 cm de espesor, casi siempre los estratos de caliza están formados por láminas de material clástico de grano fino y con frecuencia ocurren intercalaciones de lutita roja. Wilson, et.al., (1955) estiman que el espesor de esta facies no rebasa los 300 m. Cabe mencionar que

esta facies es idéntica a la Formación Cuesta del Cura, del Noroeste de México.

La similitud litológica de estas facies con rocas de edad equivalente ha llegado a crear confusión en cuanto a la terminología empleada para nombrarlas; B. Carrasco, (1970), menciona que la distinción entre las Formaciones El Abra y El Doctor ha sido hecha por conveniencia geográfica pero que realmente no existe diferencia entre ambas litologías y propone abandonar el nombre de Formación El Doctor y usar únicamente el nombre de Formación El Abra para las rocas depositadas en la extensa Plataforma de Valles-San Luis Potosí. Propone además, usar el término de "Miembro El Socavón" de la Formación El Abra para los sedimentos que circundan a la Plataforma Valles-San Luis Potosí y que son transicionales con los sedimentos de "cuenca". Al igual que Carrasco, B., (1970); Carrillo, M. y Suter, M., (1982), consideran que es probable que el banco calcáreo de El Doctor, forme parte de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí.

La siguiente tabla resume la terminología usada por varios autores y su equivalencia:

Wilson, et al., (1955)	B. Carrasco, (1970)	F.J. Longoria, (1984)
1.- Facies Cerro Ladrón	-Formación El Abra	Facies biostromal
2.- Facies El Socavón	-Miembro El Socavón de la Formación El Abra -Formación Tamabra (Holm, 1940). -Formación Pozo Rica, (Bonet, 1963).	Facies conglome- rática
3.- Facies San Joaquín	-Tipo "Tamulipas"	Facies de capas gruesas de caliza y pedernal.
4.- Facies La Negra	-Tamulipas-Superior -Cuesta del Cura (Osorio, A. y Navarro C., 1986)	Facies de capas delgadas de cali- za y pedernal.

Nota: Por congruencia con la nomenclatura empleada por C.F.E., se seguirá usando el término Formación El Doctor.

Las facies 1 y 2 son típicas de plataforma somera, contienen abundantes rudistas y trilobitos, son calizas bioclásticas de textura "grainstone-rudist" (borde de plataforma); la facies 3 en talud está constituida por brechas sinóclásticas y calizas bioclásticas de textura "packstone-grainstone", (Carrillo, M. y Suter, M., 1982).

La facies de cuenca se presenta bien estratificada y los estratos de caliza tienen textura "mudstone-wackestone".

En el área de la boquilla la facies de plataforma se presenta como conglomerados calcáreos, brechas dolomíticas, dolomías y calizas arrecifales, con un espesor máximo de 900 m, (C.F.E., 1985).

Longoria, F.J., (1984) señala que las facies de aguas profundas cubren concordantemente a la Formación Santuario, mientras que las facies de aguas someras lo hacen a la Formación Las Trancas (como en las áreas de Pisaflores y Jalpan).

Edad: Aptiano-Cenomaniano.

Fosiles: Gasterópodos (Nerinea), rudistas de concha delgada (Toucasia) y miliólidos.

Formación Soyatal.

Descrita por White, (1948) y nombrada y definida por Wilson, (1956), en el campo minero de antimonio de Soyatal, Gro. (Segerstrom, K., 1962), sobreyace a la Formación El Doctor y su contacto está constituido por un paquete de calizas delgadas de no más de 3 m de espesor. En la base se presentan calizas arcillosas y lutitas calcáreas en alternancia rítmica, predominando las primeras en la parte inferior, pero hacia la cima son más frecuentes las lutitas calcáreas acompañadas de estratos delgados y medianos de calizas y areniscas, sedimentos todos ellos característicos de una secuencia flysch. Esta formación contiene pliegues sinsedimentarios y estructurales nódulares y también es de baja competencia estructural. Wilson, (op.cit.) le estima un espesor de 150 m que se adelgaza hacia el banco El Doctor; esto fué comprobado en la exploración efectuada por C.F.E., encontrándose que en los alrededores de Bothiña, límite norte del banco El Doctor, su espesor es de solamente 8 a 20 m.

Edad: Se le asigna una edad del Turoniano en base a los fósiles Inoceramus labiatus Shlotheim e Hippurites resectus mexicanus, Segerstrom, (1956), Wilson, (op.cit.). M. Kiyokawa (en Carrillo, M. y Suter, M., 1982), determina un rango estratigráfico del Turoniano-Tardío al Campaniano en base a nanoplancton.

La Formación Soyatal pasa gradualmente a la Formación Méndez; en el área del proyecto, a causa del estado de deformación y a la similitud litológica, no fue posible separar ambas formaciones, por lo que se emplea el término Soyatal-Méndez para referirse a los sedimentos arenos-arcillosos de la parte superior. El único criterio para distinguir las formaciones Soyatal y Méndez es el morfológico, pues la primera muestra unas formas angulosas, en tanto la Formación Méndez tiende a las formas arredondadas.

Formación Méndez.

Definida en la cuenca Tampico-Misantla, corresponde a la parte alta de los sedimentos del Cretácico-Superior, incluyendo todos los estratos cuyas edades quedan comprendidas del Coniaciano al Maestrichtiano. Aquí la litología más característica la constituyen estratos gruesos de lutita gris oscura y algo carbonosa que predominan entre otros más delgados de caliza, lutita calcárea y arenisca gravada y que alternan con ellos.

En la parte inferior predominan las lutitas en estratos laminares y paquetes de 30 a 40 cm, de color gris verdoso; en la parte superior predominan areniscas de grano fino a grueso, en estratos de 20 a 50 cm de color gris claro, intercalados con lutitas laminares en paquetes de 15 a 20 cm; tanto en la parte inferior como en la superior éstas rocas intemperizan a un color pardo amarillento.

Numerosos diques de diversa composición afectan a esta unidad, que en algunas localidades presenta huellas de oleaje y trazas de vermes (al poniente del poblado del Mezquite), estimándosele un espesor cercano a los 1 000 m.

Edad: Fries, C. y Segerstrom, K., (en Segerstrom, K., 1962) le asignan la edad Coniaciano-Maestrichtiano en base a los siguientes fósiles: amonitas del género Texanites y Nowakites, microfósiles como Globotruncana, Globigerina, Gumbelina, Planoglobulina, Baculogypsina y foraminíferos.

La cima es en su totalidad una superficie de erosión, sobre la que yacen rocas cenozoicas de diversa composición, en marcada discordancia angular, (Wilson, op.cit.).

Al igual que los sedimentos de la Formación Soyatal, los de la Formación Méndez constituyen una secuencia tipo flysch Longoria, F.J., (1984), divide a la Sierra Madre Oriental en dos segmentos de diferente litostratigrafía y estilo deformacional: un segmento norte o "Segmento Victoria" y un segmento sur o "Segmento Huayacocotla"; en éste último define dos terrenos: a) El terreno Este que se caracteriza por secuencias de pliegues cerrados y b) El terreno Oeste que se distingue por bajos ángulos de corrimiento y plegamiento isoclinal con ejes estructurales subparalelos. El mismo autor considera que el flysch de la Formación Soyatal pertenece al terreno Oeste siendo más antiguo y que el flysch de la Formación Méndez pertenece al terreno Este. La formación de estos depósitos de flysch coincide con la época de generación de grandes Japétilos de esa material en la parte centro-este de México, que en algunos lugares llega a sobrepasar los 4 000 m.

Formación Elorro.

Cubre discordia leuante a la Formación Méndez y es un conglomerado bien cementado, de coloración variable en tonos de rojo a gris verdoso, de origen fluvio-lacustre (fanglomerado); sus fragmentos son de calizas, margas, arcillosos, pedernal y algunas rocas volcánicas,

mientras que su matriz es arenosa, compuesta por feldespatos, calcita, mica y cuarzo. Estos fragmentos tienen un tamaño que varía de 2 a 50 cm y son de subangulosos a subredondeados. Puede observarse cierta estratificación con inclinaciones promedio de 20° y ocasionalmente hasta 60°. La litología de este conglomerado le confiere una alta resistencia a la erosión.

En el área de estudio la Formación El Morro se extiende en una franja delgada y continua entre los cerros El Potrero y San Pascual, aflorando aisladamente en el Rancho del Mezquite y en la Ranchería La Majada.

Edad: No contiene fósiles, pero por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Eoceno Superior al Oligoceno, (Edwards, 1955; Fries et al., 1955; Segerstrom, K., 1962). Se ha observado que el conglomerado se interdigita localmente con rocas volcánicas; al poniente de Zimapán se intercala con una delgada corriente de andesita que sugiere que el inicio de la actividad volcánica en la región coincidió con el depósito final de estos sedimentos.

Cerrillo, M. y Suter, M., (1982), piensan que éste depósito podría representar una molasa intermontañosa, como producto de la formación de la faja de deformaciones laramídicas o del relieve del arco magmático propuesto por Damon (1980).

Espesor: Simmons, F.S. y Mapes, V.E., (1956), midieron espesores desde unos cuantos metros, hasta 400 m como máximo, en Zimapán.

Formación Las Espinas.

Fue definida por Simmons, F.S. y Mapes, V.E. (1956). Agrupa rocas volcánicas cuya composición varía de latita y andesita a basalto, descansando discordantemente sobre el Conglomerado El Morro y formaciones más antiguas y cubiertas a su vez, de manera discordante por la Formación Tarango.

Como lo indicaron Simmons, F.S. y Mapes, V.E. (1956), Segerstrom, K. (1964) y Wilson, et al. (1955), es difícil definir unidades en esta secuencia volcánica, más es necesario subdividirla para un estudio más detallado en virtud de que existe una masa rocosa de dimensiones considerables en posición potencialmente inestable en la zona del vaso, inmediatamente atrás de la zona de boquilla. Se distinguió en tres miembros con predominancia andesítica y un cuerpo volcánico-sedimentario.

a) Unidad 1. Está formada por derrames, tobas, aglomerados, brechas de composición andesítica, con variaciones laterales de composición más ácida (latitas y cuarzo-latitas). Frente a la zona de boquilla presenta en la base una toba arenosa de color gris claro que intemperiza a amarillento, con abundante veso, cubierta por una intercalación de derrames, aglomerados y brechas de la misma

composición, cubierta a su vez por un pequeño espesor de tobas arenosas color rojo y en la parte superior se repite la secuencia andesítica.

b) **Unidad 2.** Parece cubrir concordantemente a la primera, pero quizá éste contacto represente un hiatus, (C.F.E., 1985). Se trata de una secuencia vulcano-sedimentaria, formada por conglomerados, limolitas, areniscas, tobas arenosas y tobas bentoníticas de coloración verdosa.

c) **Unidad 3.** Está formada por derrames y brechas andesíticas y ocasionalmente basálticas con algunos horizontes vulcano-sedimentarios y paleosuelos intercalados.

d) **Unidad 4.** Este miembro superior cubre discordantemente al anterior y su composición es predominantemente ácida (cuarzo-lititas a riolitas). Es una secuencia de tobas arenosas, tobas soldadas, brechas y derrames, intrusionada por cuellos o diques riolíticos que Segerstrom (1956), asigna al Plioceno-Inferior.

El espesor total calculado para estas cuatro unidades es de 400 m, aunque algunos autores consideran que originalmente debió ser mucho mayor.

Edad: Por su posición estratigráfica y por edades radiométricas aisladas Arteaga-Pineda (1982), le asigna una edad del Oligoceno-Plioceno.

La secuencia está afectada por fallas de tipo normal con saltos variables, que en conjunto forman una serie de bloques basculados, con el bloque del techo hacia el sur, que se manifiestan por la actitud de la secuencia volcánica inclinada al NE, con una intensidad hasta de 47°.

Formación Tarango.

Fue definida por Bryan (1948), al SW de Mixcoac, D.F. En el Área de estudio aflora aisladamente en la parte sur, cerca del puente de Tasquillo, en los poblados Aljibes y La Sabina. Está constituida por conglomerados, areniscas, lutitas y estas tobas arenosas, presenta grietas de desecación, estratificación cruzada y paleocauces. Se originó como relleno de cuencas cerradas.

Su espesor varía de centímetros en los límites de la cuenca hasta más de 400 m en la parte central de la misma y sus límites se localizan al SE del Área.

Edad: Cubre discordantemente a la unidad riolítica superior de la Formación Las Espinas y en partes está cubierta por una delgada capa de basalto más reciente. Su edad es Plioceno-Tardío, (C.F.E., 1985).

Basalto:

Sin definición formal, ocupa toda la porción sureste del Área. Está constituido por intercalaciones de derrames, brechas y tobas de composición básica, con predominio local de material piroclástico. El espesor máximo en el área es de 300 m en las márgenes del Río San Juan.

Edad: Por su posición se le asigna una edad probable del Plioceno-Tardío (Cosío A., J.A. y Navarro, C., J.I., 1988).

Depósitos Recientes.

Son del tipo de terrazas, suelos aluviales y residuales, depósitos de abanico aluvial antiguo (Conglomerados Zimapan y Daxhi), que han sido nombrados formalmente (Simmons y Mapes, 1956), y son cartografiables, pero de extensión reducida. Casi todas éstas unidades están constituidas por grava y arena parcialmente consolidadas y cubiertas en algunas ocasiones por una costra de caliche. La composición de los fragmentos varía de acuerdo con la zona; los suelos residuales son de arcilla, que en su parte sur proviene del basalto y en la norte por disolución de caliza, originando depósitos de "Terra Rosa".

Rocas Igneas Intrusivas y Metaórficas.

Ocurren en muchos lugares y en sus contactos se produjo pirometasomatismo, su edad varía del Paleoceno-Tardío al Oligoceno. Se describieron previamente en el capítulo de Geología Regional.

TECTONICA:

El depósito de la Formación Las Trancas ocurrió simultáneamente a la subducción de la Placa Farallón debajo de la placa de Norteamérica durante el Jurásico-Tardío (Coney, 1978, en Carrillo, M. y Suter, M., 1982), con un arco magmático asociado (arco volcánico de Alisitos) que aportó los detritos de composición ácida que se presentan en la porción occidental de la Formación Las Trancas; éstos detritos se depositaron inmediatamente atrás del arco y son, por tanto, más gruesos y más abundantes aquí que en la porción oriental. La tectónica de ese tiempo fué distensiva (Carrillo, M. y Suter, M., 1982) como lo evidencian las fallas normales intraformacionales presentes en las rocas de la Formación Las Trancas. De acuerdo con Longoria, F.J., (1984), durante el Kimmeridgiano-Titoniano hubo expansión activa del piso oceánico en el Golfo de México.

Después del depósito de la Formación Las Trancas la subducción continuó ocasionando un corrimiento de la secuencia eugeosinclinal (terreno Oeste) sobre la secuencia miogeosinclinal (terreno Este), según Longoria, F.J., (1984), construyendo la topografía sobre la que se edificaron las plataformas calcáreas, cuya geometría probablemente

estuvo controlada en la dirección N-S por fallas normales anteriores del Jurásico Medio-Superior (Carrillo, M. y Suter, M., 1982).

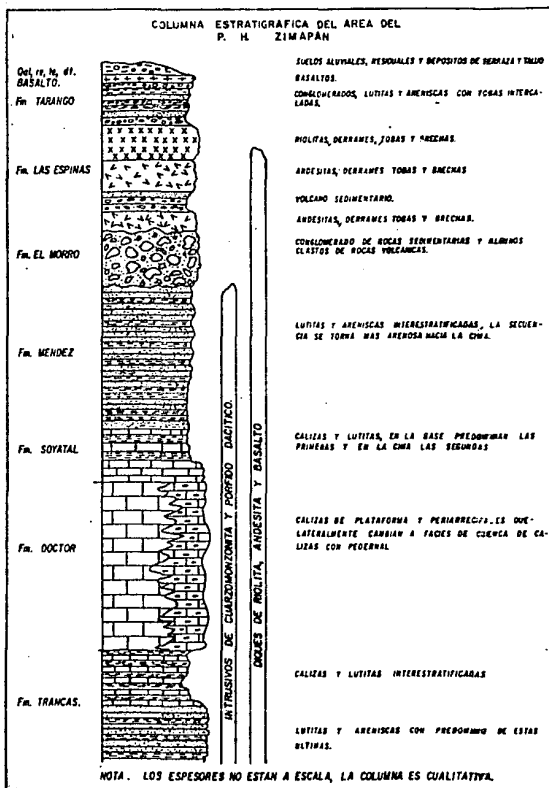
La Formación Soyatal, al igual que la Formación Las Trancas, por su composición son mecánicamente incompetentes, no así la Formación El Doctor que es de alta competencia estructural; por tanto, el estilo deformacional durante la Orogenia Laramide estuvo controlado por la litología y espesor de las rocas carbonatadas, presentándose largas cobijaduras al oriente del banco El Doctor y en ambos bordes de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, (Suter, M., 1981), mientras que en las facies de cuenca y del interior de plataformas se desarrollaron pliegues paralelos tanto abiertos como cerrados. La ocurrencia y ubicación de las cabalgaduras, de acuerdo con Carrillo, M. y Suter, M., (1982), se explican por una concentración de esfuerzos tectónicos tangenciales, causada por la disminución del área transversal en la facies de cuenca. Los mismos autores cuantificaron un acortamiento lineal absoluto de 16.8 km (de un total de 53 km), por lo que el acortamiento relativo es del 24%.

La componente horizontal máxima del campo de esfuerzos es ENE-WSW ya que el rumbo regional de las estructuras laramídicas es de N-NW.

Después de la Orogenia Laramide se desarrollaron otras estructuras, que Carrillo, M. y Suter, M., (1982), resumen como:

- a) Deformaciones extensionales del Paleogeno.
- b) Estructuras compresivas posteriores a la Formación Las espigas.
- c) Fallas normales de tipo "Basin and Range" (como la Falla Tula del P.H. Zimapán).

ESTRATIGRAFIA



Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Figura 3.

Septiembre de 1988

En general se considera que la secuencia mesozoica se desarrolló y evolucionó sobre basamento Precámbrico y Paleozoico que no es sino una prolongación del cinturón Ouachita del SE de Estados Unidos (Morán-Z., D.J., 1984).

Este basamento fue dislocado en la primera mitad del Mesozoico durante la apertura del Golfo de México, propiciando la distribución paleogeográfica de cuencas y plataformas que posteriormente controlarían la sedimentación y las deformaciones laramídicas.

Como ya se indicó, durante el depósito de la Formación Las Trancas existió al oeste, una zona de subducción, con su arco magmático asociado: el arco volcánico de Alsitos, que produjo un paleorelieve inclinado al este y aportó los sedimentos clásicos de mayor tamaño de la Formación Las Trancas, imprimiéndole además un carácter vulcano-sedimentario.

Por otra parte, ocurrieron fluctuaciones en el nivel del mar. Del Kimmeridgiense al Portlandiano la línea de costa se localizaba 50 km al oeste del Puerto de Las Trancas, a la altura de Bernal, Qro. A principios del Cretácico, el mar retrocedió de tal manera que durante el Neocomiano la línea de costa se ubicó a unos cuantos kilómetros al este del Puerto de Las Trancas y el mar continuó retrocediendo, (Segerstrom, K., 1962). En tanto en el Golfo se formó corteza oceánica rodeada de depósitos evaporíticos (Buffer et al., 1980, en Carrillo, M. y Suter, M., 1982). La expansión del piso oceánico en el Golfo de México cesó para el Valanginiense-Hauteriviense, (Longoria, F.J., 1984).

Este último autor propone que del Valanginiense al Barremiano tuvo lugar una colisión mayor de placas, resultando en el cabalgamiento hacia el este del dominio eugeosinclinal, sobre el dominio miogeosinclinal.

Para el Albiano, las aguas marinas someras incursionaron en el continente hasta unos 100 km o un poco más, alcanzando incluso el actual estado de Guanajuato, (Segerstrom, K., 1962).

Es ésta la época en que florecieron las extensas plataformas carbonatadas de El Doctor y Valles-San Luis Potosí, separadas por una cuenca intracratónica (Cuenca de Zimapan).

En seguida se depositó en todo el NE de México una secuencia marina repetida de tipo flysch, que en el área está representada por las formaciones Soyatal y Méndez. Estos depósitos evidencian la gran transgresión marina del Cretácico Superior.

Hay evidencias de que la Formación El Doctor fue localmente erosionada durante el depósito de la Formación Soyatal, conservándose parcialmente el paleorelieve del Cretácico Medio entre el Banco El Doctor y la Cuenca de Zimapan. La ausencia de un conglomerado basal entre las Formaciones El Doctor/ El Abra y Soyatal indica que no existió erosión regional previa al depósito de la Formación Soyatal,

Carrillo, H. y Suter, H., (1982).

Los mismos autores señalan que del Paleoceno al Eoceno Temprano, se dejó sentir la acción de la Orogenia Laramide, formando estructuras de rumbo regional N-NW, lo que indica que la componente horizontal máxima de los esfuerzos que las produjeron tuvo una orientación ENE-WSW. Las deformaciones ocurridas dieron lugar a la faja de pliegues y cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental, llegando a tener estas cabalgaduras de 2 a 3 kilómetros de traslape.

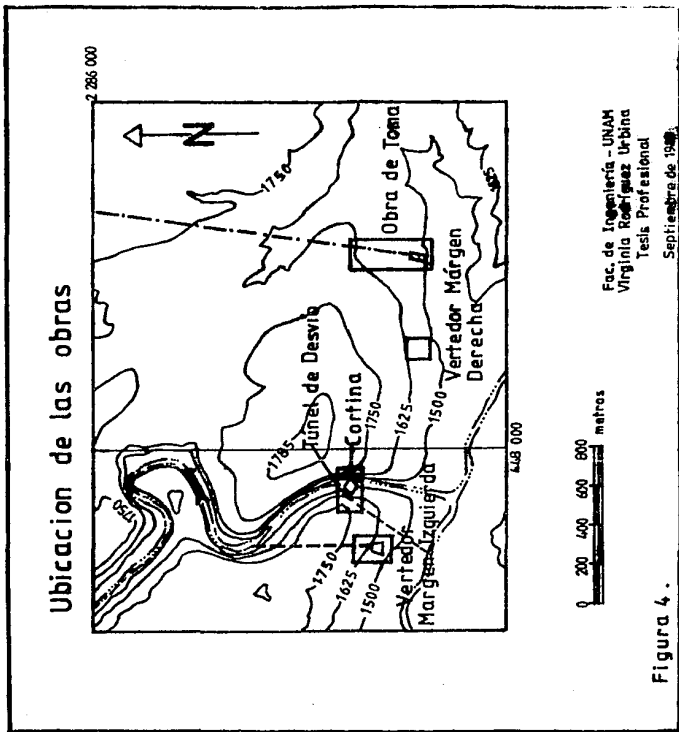
El alto relieve del terreno causó rápida erosión y el depósito de material clástico muy grueso en cuencas, para formar el conglomerado El Morro. La existencia de este conglomerado permite establecer que:

- a) el conglomerado rojo es más reciente que el episodio de plegamiento, y
- b) su presencia indica una retirada del mar antes del Eoceno Tardío. (Segerstrom, K., 1962).

A nivel regional, después de la Orogenia Laramide se emplazaron los cuerpos intrusivos del Paleoceno Tardío al Oligoceno, afectando inclusive, a la parte basal de la Formación Las Espinas.

Otros eventos deformacionales menores ocurrieron posteriormente a la Orogenia Laramide y son los que ya antes se mencionaron: deformaciones extensionales (del Paleoceno), un período compresivo y un fallamiento normal del tipo "Basin and Range".

Finalmente, actuaron los agentes denudatorios que dieron origen a los depósitos recientes, entre ellos, los conglomerados Zimapán y Daxhá y los suelos aluviales y residuales.



Fac. de Ingeniería - UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional
Septiembre de 1988

Figura 4.

CAP. V. GEOTECNIA EN LOS SITIOS DE:

Cortina
Vertedor
Obra de tomas
Embalse

V.1. CORTINA.

Como el Cañón del Infiernillo es estrecho, no es posible recurrir a una cortina de enrocamiento con pantalla de concreto aguas arriba, pues en este caso plantearía dificultades constructivas y de acceso. Por tal motivo se considera que la estructura apropiada es una cortina de concreto tipo arco-bóveda con tapón en el fondo, con 200 m de altura, desplantada a la cota 1 365 msnm. Se pretende que la corona de la cortina sirva como vía de comunicación entre ambas márgenes del Río Moctezuma.

Para localizar apropiadamente el sitio en el que quedará ubicado el eje de la cortina se realizaron estudios geológico-geofísicos en el área de la boquilla, con 5 socavones de exploración y 14 barrenos en una primera etapa; en la segunda etapa de exploración se perforaron 3 barrenos.

En total se estudiaron 4 posibilidades de localización del eje de cortina y si fueron desechadas fue solamente por problemas constructivos y no por problemas geológicos de importancia. Los socavones se excavaron sobre la alternativa "B" de eje de cortina (Figura 5, 5-A), están un poco desfasados a causa del costo del camino de acceso y fué la única alternativa en que se realizó este tipo de exploración.

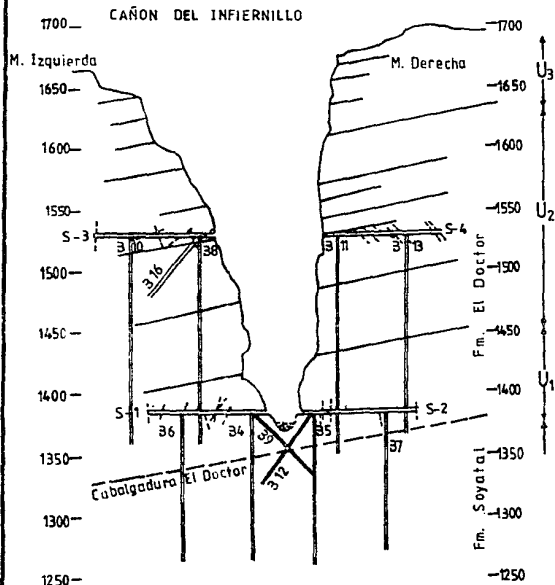
La alternativa definitiva es la llamada alternativa "B" (Figura 5) localizada 400 m aguas abajo de la confluencia, ubicación que permite tener una distancia de por lo menos 50 m entre el desplante de la presa y el contacto El Doctor-Soyatal (verificado con el barreno E2-1), además de que el relieve es más abrupto y por lo tanto, el cañón más estrecho.

La boquilla tendrá una sección asimétrica, con la margen derecha vertical y la izquierda abriéndose a partir de la elevación 1 520.

Litología.

Aflora la Formación El Doctor (Figuras 5 y 5-A), que en la parte alta presenta una interestratificación de calizas micríticas y dolomías, así como rasgos de disolución en forma de lapiaz, mientras que en la parte baja predomina la brecha dolomítica y la dolomía en estratos gruesos y medianos (0.6 a 2.5 m); el contacto entre ambas no

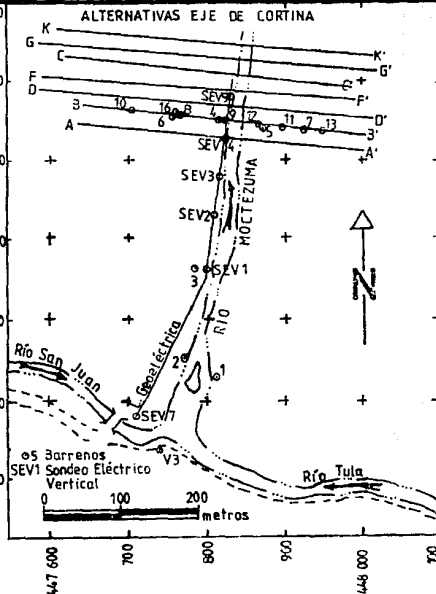
SECCION ALTERNATIVA "3" EJE DE CORTINA



Palacios-Nieto, 1982 (Simplified)

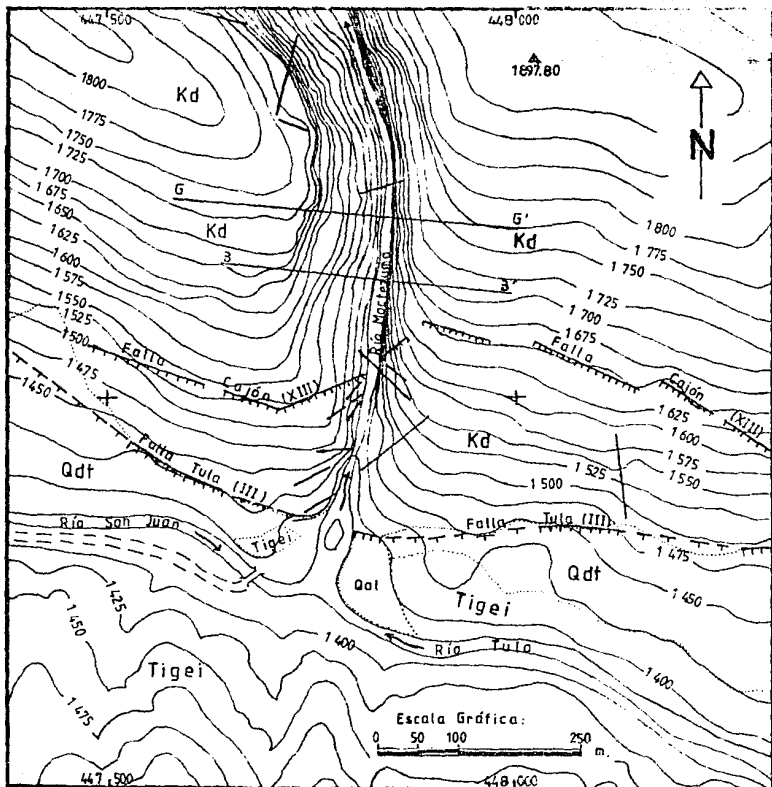
Figura 5.

2284 800



Fac. de Ingeniería - UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Septiembre de 1988



GEOLOGIA DE LA ZONA DE BOQUILLA (Según C.F.E.)
 (P. H. ZIMAPAN)

LITOLOGIA:

- Qal** Depósitos aluviales
- Qdt** Depósitos de talud
- Tigei** Andesitas, tobas y brechas
- Kd** Fm. El Doctor: calizas y dolomías

SIMBOLOGIA:

- Fractura
- Contacto geológico
- - - Terracería
- Alternativas de eje de cortina

Fac. de Ingeniería-UNAM
 Virginia Rodríguez Urbina
 Tesis Profesional

Figura 5A.

Septiembre de 1988

se ha determinado con precisión a causa de la inaccesibilidad del cañón, pero se localiza arriba de la cota 1 525. La misma litología fue reportada en los barrenos B, 10 y 16.

Palacios-Nieto, M., (1982), subdividió la Formación El Doctor, en 3 unidades litológicas, (Figura 5), en base a sus características físicas:

- Unidad 1. (U₁):** Dolomía masiva de color gris oscuro en bancos gruesos, interestratificada con capas de caliza dolomítica de 0.5 a 1 m de espesor.
- Unidad 2. (U₂):** Caliza dolomítica en bancos gruesos, de 10 a 15 m de espesor. Cada banco está separado por planos de estratificación abiertos superficialmente, debido a la presencia de lutitas. Las paredes presentan pequeñas oquedades producidas por disolución.
- Unidad 3. (U₃):** Caliza dolomítica de color crema, en estratos de 1 a 2 m de espesor.

En ambas márgenes se presentan estratos delgados de roca arcillosa, de espesor irregular que va desde milímetros hasta 10-15 cm, muy compacta, color amarillo cuando está fresca y rojo al alterarse, la distribución de estas rocas arcillosas parece seguir los planos de estratificación, adelgazándose y engrosándose de manera irregular hasta desaparecer. Petrográficamente se ha clasificado como una dolomía, de origen químico, con posterior recristalización, causada por la fricción entre planos de estratificación al tiempo del cabalgamiento.

Por su distribución un tanto irregular y su difícil acceso, sobre todo en la margen derecha, no fue posible hacer un levantamiento completo de dichas rocas arcillosas, que además no constituyen una fuente de futuros problemas para el P.H. Zimapan.

Se levantaron 74 discontinuidades con relleno arcilloso, correspondientes a planos de estratificación y se colocaron en una roseta que permitió observar que predominan las de rumbo NNE 0°-20° SSW. Al trabajar en una red de Wulff esos datos se nota una clara agrupación de polos en la parte central del estereodiagrama, lo que significa que sus echados son suaves (0° a 20° aprox.) y buzan hacia el noroeste.

La recopilación de datos en las figuras 6 y 6-A, permiten confirmar el origen por fricción, durante el cabalgamiento, de estas rocas arcillosas, pues coinciden burdamente con planos de estratificación que facilitaron el movimiento. Los estudios petrográficos (Anexo I), también sugieren el mismo origen para esas rocas arcillosas.

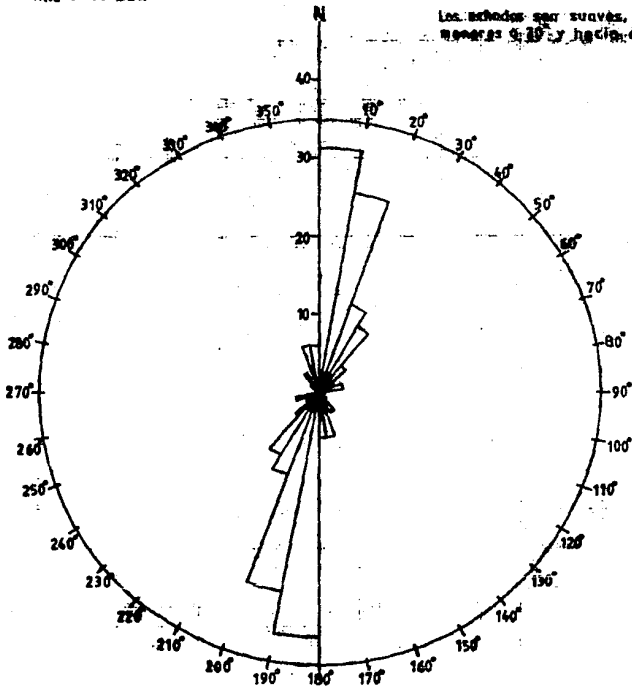
En la parte Laja del cañón, a unos cuantos metros de la entrada, aflora el contacto tectónico entre las formaciones El Doctor y Soyatal; en este sitio se verificó la existencia de la cabalgadura de la Formación El Doctor sobre la Formación Soyatal al muestrear ésta última y efectuar un análisis micropaleontológico en el que se

ROSETA DE LAS DISCONTINUIDADES (ESTRATIFICACION) CON RELLENO ARCILLOSO.

MADRID - ESPAÑA

Predomina los de rumbo:
NNE 0°-20° SSW

Los sectores son suaves, gradualmente
mayores 5° y hacia el NW.



Roseta elaborada con 74 datos.

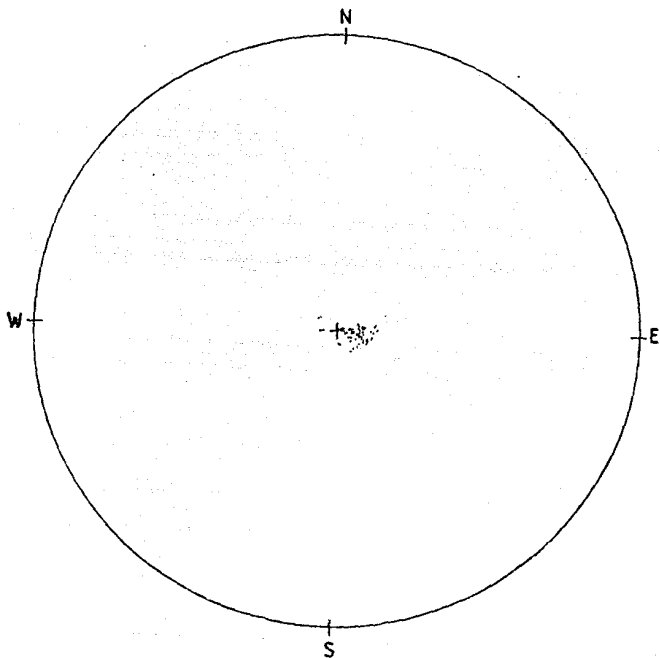
Figure 11

Septiembre de 1960

Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Ingeniera Profesional

DIAGRAMA DE POLOS DE LAS DISCONTINUIDADES
(ESTRATIFICACION) CON RELLENO ARCILLOSO.

Margen Izquierdo.



No. de datos analizados: 74

Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Figura 6A.

Septiembre de 1988

determinaron asociaciones de microfaua pelágica indicativa del Turoniano-Coniaciano (Becerra-Hdez. en Falacios-Nieto, 1981).

Se encontraron los siguientes microfósiles:

<u>Pithonella ovalis</u>	<u>H. delricensis</u>
<u>Heterohelix</u> sp.	<u>Clavhedbergella</u> sp.
<u>H. roussi</u>	<u>Dicarinella</u> sp.
<u>Globigerinelloides</u> sp.	<u>Whiteinella</u> sp.
<u>Hedbergella</u> sp.	<u>Hastigerinoides</u> sp.
<u>H. amabilis</u>	

En el mismo afloramiento se observó que la Formación Soyatal presenta desarrollo de crucero e intensa deformación asociada al dinamometamorfismo que se produjo; con el barrenó E2-1 se determinó que el fenómeno del dinamometamorfismo afectó a la roca hasta una profundidad de 15 m.

Estructuras Geológicas.

Los estratos en la zona de la boquilla tienen una suave inclinación ($\pm 10^\circ$) hacia el surponiente. En la parte baja del cañón se observan 3 pliegues buzantes al NW con intensidades que varían de 7° a 46° . Se observan fallas menores de salto pequeño, paralelas al eje de los pliegues, cuya inclinación es de 80° - 85° al NE y SW y están selladas por calcita, al igual que los cuatro sistemas de fracturas definidos, cuya orientación es: N 10° E, N 25° E, N 45° E y N 20° W. Estas fracturas llegan a estar abiertas, pero solo en la zona de decompresión y son de corta extensión, por lo que es difícil correlacionarlas entre las partes alta y baja del cañón.

Exploración.

a) METODOS INDIRECTOS: primeramente se realizaron estudios de geofísica sobre la alternativa "B".

Se aplicó el método de refracción sísmica, mediante 9 tendidos cortos (24 m de longitud) sobre las paredes de los socavones, habiéndose calculado las siguientes propiedades promedio:

Espesor de roca decomprimida	Ed (m)	0.34-0.52
Velocidad de onda compresional	Vp (m/s)	5 644
Velocidad de onda de corte	Vs (m/s)	3 054
	Vp/Vs	1.85

Nota: Vp y Vs corresponden a la roca no afectada por la decompresión.

La velocidad de onda compresional permite investigar los macizos rocosos, concluyéndose en este caso, que no existe alguna anomalía importante que pueda ser interpretada como zona de debilidad.

Por otra parte, se enviaron al Laboratorio de la Subgerencia de Ingeniería Experimental de la C.F.E., los núcleos para determinar el Peso Volumétrico (ρ), Resistencia a la Compresión Simple (R_c) y el Módulo Elástico de Young (E). A otras dos muestras se les hizo determinación de su Densidad Aparente en el Laboratorio de Análisis Químicos de la C.F.E.

Barrero	Prof. (m)	Socavón	τ (g/cc)	R_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)
No. 6	20	1	2.77	1 279	800 000
No. 7	20	2	2.50	---	---
No. 10	110	3	2.64	---	---
No. 13	110	4	2.77	859	727 273

Considerando una densidad promedio de 2.7 g/cc se obtuvieron las propiedades elástico-dinámicas:

Relación de Poisson	$\nu = 0.29$
Módulo de corte	μ (kg/cm ²) = 257 900
Módulo de Young	E (kg/cm ²) = 663 500
Módulo de compresibilidad	k (kg/cm ²) = 540 700

En base a las propiedades obtenidas se concluye que el macizo rocoso es de buena a excelente calidad, ya que no presenta discontinuidades importantes.

La posición del contacto El Doctor-Soyatal se determinó por medio de una línea geoelectrica de aproximadamente 450 m de longitud, efectuándose 6 sondeos eléctricos verticales (SEV), en una sección paralela al cauce del Río Moctezuma sobre la margen izquierda. Se determinaron 3 capas geoelectricas, las dos superiores corresponden a la Formación El Doctor y la inferior a la Formación Soyatal que se inclina en dirección de aguas abajo.

El extremo de aguas arriba de la línea geoelectrica (SEV-7) determina tres capas de rocas y materiales volcánicos y un sustrato (80 R-m) a 64 m de profundidad que parece ser la continuación de la Formación Soyatal a la vez que la prolongación de la Falla Tula en el subsuelo.

Como ya se mencionó, estos parámetros se obtuvieron en la alternativa "E" del eje de cortina, pero se pueden extrapolar a la alternativa "G" por la similitud de características que ambas presentan.

Posteriormente, en 1986, se efectuó exploración con el método de refracción sísmica a 30 y 40 m aguas arriba de la alternativa "G" por inaccesibilidad, obteniéndose las siguientes propiedades:

E_d (r)	0.29-1.20	promedio: 0.61
V_p (m/s)	5 080-6 363	5 817
V_s (m/s)	3 298	
ν	0.25-0.71	

Como puede verse, son valores del mismo orden de magnitud que los obtenidos en la sección "B" y que confirman la similitud de características mencionadas para ambas alternativas:

b) METODOS DIRECTOS: se excavaron en el área de la boquilla cinco socavones en total y se perforaron 17 barrenos.

Socavones.

Cuatro de ellos se excavaron tratando de hacerlos coincidir con el eje de la alternativa "B", dos de ellos (S-1 y S-3) situados en la margen izquierda y los otros dos (S-2 y S-4) en la margen derecha. Cada uno de estos socavones tiene una longitud de 100 m; además en cada socavón se excavaron, hacia aguas abajo, cruceros de 10 m de longitud cada uno, para efectuar pruebas de mecánica de rocas "in situ". Todos los socavones tienen 2 cruceros, a excepción del socavón 3, que tiene 3.

El quinto socavón es el más pequeño, se sitúa sobre la margen izquierda y su objetivo fue observar la actitud del contacto El Doctor-Soyatal.

A continuación se describen las características más sobresalientes de cada socavón:

Socavón 1. Orientado N 80° W.

Se localiza sobre la margen izquierda, a la cota 1383, con dos cruceros, uno situado en el cadenamiento 0+10, y el otro en el cadenamiento 0+40. Las capas observan la tendencia regional hacia el NW con una inclinación de 32° a 44°.

Se contaron 71 fracturas con echados que varían de 69° hasta verticales, predominando las de orientación NW y NE. Se agruparon en cuatro sistemas: N 25° E, N 30° E, N 25° W y N 45° W. Puede decirse que las fracturas son poco frecuentes, están rellenas de calcita o cerradas y son de poca importancia. En éste socavón no se presentó zona de decompresión. En los cruceros se observan condiciones similares.

Socavón 3. Orientado N 78° W.

También situado en la margen izquierda, a la cota 1 525, este socavón tiene tres cruceros, ubicados en los cadenamientos 0+10, 0+30 y 0+70. Las capas muestran la misma tendencia a inclinarse hacia el NW pero con menor intensidad: 10° a 26°. Las fracturas contadas fueron 67 con planos preferentemente inclinados al NW y casi verticales. También se agruparon en cuatro sistemas: N 65° W, N 35° E, N 40° W y N 60° E. Las fracturas son escasas, con zonas de concentración bien localizadas donde llegan a tener una frecuencia de 3 o 4 fracturas por metro. La zona de decompresión en este socavón alcanzó 15 m, medidos desde la entrada.

Socavón 2. S 35° E.

Fue excavado en la margen derecha a la elevación 1 383, con dos cruceros, en los cadenamientos 0+10 y 0+40. Las capas tienen el mismo comportamiento, están inclinadas al NW con inclinación de 14° a 16° y menos, inclusive 8°. Predominan las fracturas verticales. Se contaron en total 82 fracturas pero solamente son 12 las fracturas principales y ocasionalmente llegan a presentarse 2 a 3 fracturas por metro. Se determinaron tres sistemas N 35° E, N 40° W y N 55° E. Al igual que en los socavones 1 y 3, las fracturas son de poca importancia y están cerradas o rellenas de calcita.

Socavón 4. S 70° E.

Fue excavado en la margen derecha a la elevación 1 525, con dos cruceros, en los cadenamientos 0+10 y 0+60. Las capas se inclinan 10° y 22° al NW, se observan rasgos de disolución (asociados casi siempre a fracturamiento vertical) en el techo, en los cadenamientos 0+43 y 0+57.

Se contaron en total 88 fracturas y de ellas 15 determinan un sistema N 40° W con algunas variaciones en rumbo y echado. La separación entre fracturas es de 5 a 10 m. Estas fracturas son de poca importancia, cerradas o con relleno de calcita. En este socavón, al igual que en el socavón 2, la zona de decompresión alcanza 15 m, medidos a partir de la entrada.

Socavón 5. N 65° W.

Excavado sobre la margen izquierda. Tiene forma de escuadra y su longitud total es de 19 m. Se expone la cabalgadura en ambas tablas y en los dos segmentos del socavón y el contacto El Doctor-Soyatal aparece diagonal y a veces paralelo a él. Los estratos están muy deformados por dinamometamorfismo y cerca del contacto existe una milonita de color negro verdoso (a causa de la presencia de carbón). Con ésta exploración se confirma el origen tectónico de esta estructura. Se contaron 20 fracturas agrupadas en dos familias: N 40° W y N 60° E. La calidad de la masa rocosa es muy variable pues la litología lo es también, así como sus condiciones físicas.

Barrenación.

Este tipo de exploración se ha efectuado con mayor énfasis en la zona de la boquilla, perforándose 14 barrenos en una primera etapa.

Los barrenos de la margen derecha se perforaron de la siguiente manera: tres inclinados, dos de ellos a 20° y el otro a 45°, los otros cuatro se perforaron en posición vertical.

En la margen izquierda se perforaron dos barrenos inclinados a 45° y los cinco restantes verticales.

El total de metros barrenados fue de 1 719, correspondiendo 889 a la margen derecha y 830 a la izquierda.

La litología observada es muy similar en todos los barrenos, lo que se debe a que la secuencia es muy homogénea y la separación entre barrenos es pequeña. La Formación El Doctor se presenta como brechas dolomíticas, interestratificadas con cuerpos delgadas y esporádicos de caliza micrítica, a veces, la Formación El Doctor aparece en estratos potentes, con fauna recristalizada y dolomitizada, con algunas fracturas pequeñas sin importancia. La Formación Soyatal fue encontrada a diversas profundidades, estando más sepultada en la margen izquierda, el contacto entre ambas rocas está marcado por una milonita o filonita, cuyo espesor varía de unos cuantos mm hasta 22 cm, hacia abajo la secuencia cambia a lutitas bituminosas interestratificadas con calizas delgadas.

Las pruebas de permeabilidad realizadas fueron de tipo Lugeon, obteniéndose valores muy bajos a nulos en ambas formaciones.

Los valores de permeabilidad, de recuperación y el RQD promedio en esta etapa de barrenación fueron:

Margen	Permeabilidad (U. Lugeon)	% Recuperación	RQD
Izquierda	0.66	92	81
Derecha	0.88	87	78

El alto RQD es, más que nada, representativo de la Formación El Doctor. La máxima permeabilidad se obtuvo en calizas y lutitas de la Formación Soyatal, alcanzando un valor de 2.1 U.L.

En una segunda etapa se perforaron 3 barrenos más sobre la margen izquierda: E2-1, E2-2 y E2-3, con el fin de verificar algunos puntos. Los barrenos E2-2 y E2-3 se perforaron 20 m aguas arriba y 80 m aguas abajo, respectivamente, de la alternativa "G".

El barreno E2-1 tuvo como objetivo localizar el contacto El Doctor-Soyatal en el sitio de la alternativa "G", encontrando que dicho contacto tectónico, marcado por una milonita color café rojizo, de 5 cm de espesor, se sitúa a 58.3 m de profundidad, siendo bastante regular. Además, esta exploración puso de manifiesto que el fenómeno de dinamometamorfismo afectó hasta una profundidad de 15 m por abajo del contacto, encontrándose milonitas y calizas miloníticas, que en este sitio contienen pirita, materia carbonosa y fósiles. Las características físicas de ésta roca, permiten clasificarla como sana, su RQD fué de 72% y su permeabilidad promedio de 2.0 U.L.

Pruebas de Mecánica de Rocas.

Se efectuaron pruebas de gato plano, pruebas de placa, roseta y gato Goodman en los cruceros excavados dentro de los socavones de exploración de la alternativa "B".

TABLA V.1.

CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO ROCOSO
AREA DE LA CORTINA (CIMENTACION)

PARAMETROS		Resistencia Comp.Simple	R.O.D.	Separación entre fracturas	Estado del fracturam.	Condición Agua Subt.	Ajuste por Orientación de fracturas	Q	Clasificación	Calidad
Margen	Parte alta	1 069	82.4	> 2 m 0.66 a 2 m	Lig. rugosas Sep. 1 mm	Lig. Húmedo	Favorable			
Izquierda	Parte baja	1 069	75.2	> 2 m 0.66 a 2 m	Bordes duros	Lig. Húmedo	Favorable			
VALORACION	Parte alta	12	17.0	15 a 10	25	10	2	77-72	II	Buena
	Parte baja	12	17.0	15 a 10	25	10	2	77-72	II	
Margen	Parte alta	1 069	80.5	> 2 m 0.66 a 2 m	Lig. rugosas Sep. 1 mm	Lig. Húmedo	Favorable			
Derecha	Parte baja	1 069	65.4	> 2 m 0.66 a 2m	Bordes duros	Lig. Húmedo	Medias			
VALORACION	Parte alta	12	17.0	15 a 10	25	10	2	77-72	II	Buena
	Parte baja	12	13.0	15 a 10	25	10	7	68-63	II	

* Tomando en cuenta buzamiento de las capas.

NOTA: El Área de la cimentación estará exclusivamente en la Formación El Doctor, en el flanco de un plegamiento anticlinal muy suave que hacia arriba desaparece.

Como complemento a estas pruebas se realizaron en el laboratorio ensayos de compresión simple y compresión triaxial, deformabilidad bajo carga axial simple y tensión indirecta (prueba brasileña); además, se determinó el peso volumétrico con su contenido de agua.

La masa rocosa se clasificó (tabla V.1), según Barton, (1980) y Bieniawski, (1979), como de buena calidad, aún en las zonas con alto índice de fracturamiento y a pesar de que por las fracturas llegan a ocurrir pequeñas infiltraciones de agua subterránea.

En base a la anterior clasificación y a los resultados obtenidos de las pruebas y ensayos se concluyó lo siguiente:

La margen izquierda tiene una calidad un poco mejor que la margen derecha.

Para empalar la cortina será necesario remover la roca decomprimida y excavar algunos taludes.

La cortina estará completamente cimentada en la Formación El Doctor, por lo que no se consideró necesario determinar la calidad de la masa de roca subyacente (Formación Soyatal), pero se estima que corresponde a una calidad media, clase II, según la clasificación ya citada.

OBRA DE DESVIO.

Para mantener seca el área de cimentación de la cortina e iniciar su construcción, será necesario desviar previamente las aguas del río; esto se logrará mediante la construcción de un par de ataguías, una hacia aguas arriba del sitio de la cortina para impedir el paso del agua, y otra aguas abajo que evitará su regreso, así como también con la construcción de un túnel en la margen izquierda que captará las aguas mediante un canal de llamada, devolviéndolas al cauce del río después de la ataguía de aguas abajo; de esta manera queda en seco la porción del cauce que será el recinto de la cortina.

El portal de entrada de esta obra se localiza en las coordenadas:

X =	447 558.50
Y =	2 284 395.00
Z =	1 383.00

El túnel de 9.40 m de diámetro, con una tolerancia de sobreexcepción de 20 cm, tendrá una longitud de 622 m, pendiente $s = 0.012$, y salida a la cota 1 376.00 msnm.

Litología.

Para conocer las condiciones geotécnicas en la zona de construcción del túnel de desvío, incluidos los portales de entrada y salida, se exploró un área de 0.45 km², sobre la margen izquierda de los ríos San Juan y Moctezuma.

De la exploración realizada, se determinó la existencia de tres tipos litológicos diferentes:

a) Las rocas de la Formación El Doctor, constituidas de calizas en estratos de 40 cm a 1 m de espesor, orientados N 45°-60° W, e inclinados 10° a 20° al SW. Sus características son similares a las descritas para aquellas que afloran en la parte baja del área del eje de cortina.

b) Rocas volcánicas de composición andesítica, coloración rojiza y con un alto grado de intemperismo y de fracturamiento. Sobre estas rocas se excavará un tramo del canal de llamada de 40 m de longitud, desde su inicio en el Río San Juan hasta topar con la Falla Tula a la cota 1 383. (Ver figura 7).

c) Depósitos de talud y aluvión que cubren a las rocas volcánicas terciarias, el depósito de talud está asociado a la Falla Tula y está constituido por bloques de caliza dolomítica de tamaño variable, los mayores tienen 1.5 m de arista, pero los más comunes tienen entre 30 y 50 cm, habiéndolos menores, además de grava, arena y arcilla. No se conoce el espesor de este depósito de talud, pero Garrido (1987), lo considera menor a 5 m.

Este depósito ocasionará frecuentes bloques caídos, principalmente en la margen izquierda, donde es mayor la pendiente del terreno natural, por lo que debe atenderse con más detalle la estabilidad de este talud.

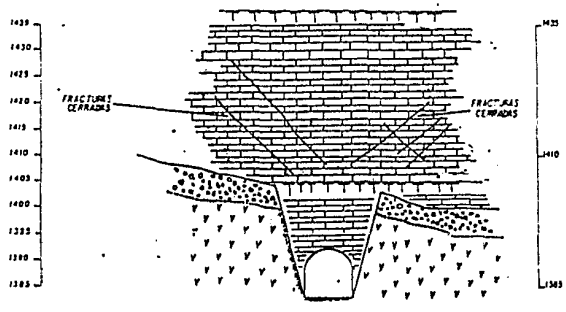
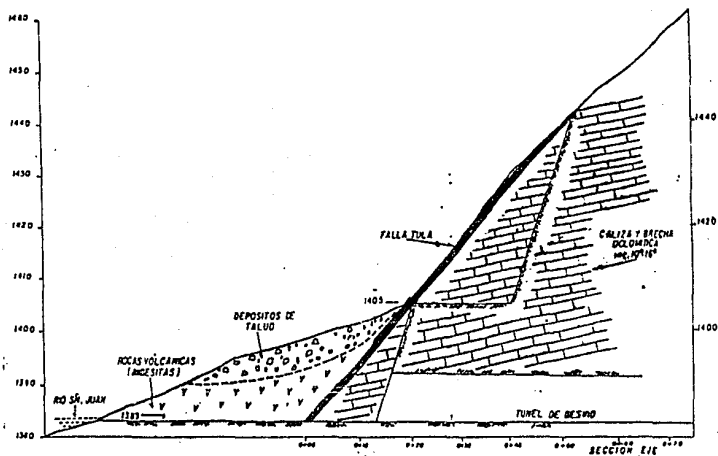
El material de talud se extiende hasta unos 150 m aproximadamente del eje del túnel de desvío, entre las elevaciones 1 390 y 1475. (Figura 7).

Estructuras Geológicas.

La única estructura importante es la Falla Tula, con una orientación local N 65° W y con un echado de 42°-48° SW, la falla presenta una zona de brecha cementada, cuyo espesor varía de 50 cm a 1.5 m. (Figura 7-A).

Esta falla pone en contacto a las rocas volcánicas andesíticas de la Formación Las Espinas y a las calizas dolomíticas de la Formación El Doctor y es la que ocasionó el depósito de talud que se describió antes.

PORTAL DE ENTRADA TUNEL DE DESVIO



Tomado de Garrido U. 1987, CFE

Fac. de Ingeniería - UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Figura 7A.

Septiembre de 1988

El emportalamiento del túnel de desvío coincide con el plano de la Falla Tula (cadenamiento 0+000), el túnel de 9.2 m de diámetro iniciará en el cadenamiento 0+013.

Exploración

Se exploró esta área conjuntamente con la zona de boquilla, es decir, se cubrió con la misma sección geoelectrica paralela al cauce del río, en la que se determinó que el contacto entre las Formaciones El Doctor-Soyatal tiene una tendencia a inclinarse hacia aguas abajo; de esta manera, la obra de desvío atravesará solamente las rocas de la Formación El Doctor estudiadas para la boquilla y jamás tocará las rocas calcáreo-arcillosas de la Formación Soyatal. Esto garantiza que la obra civil se realizará dentro de una masa rocosa de buena calidad, calidad que se verá un poco disminuida en la entrada solamente.

Aunque no se hizo exploración geofísica en este lugar, se considera posible extrapolar, dada la homogeneidad litológica, los parámetros obtenidos en los estudios efectuados en la alternativa "B".

Los datos anteriores y el levantamiento de geología superficial a detalle permiten definir las condiciones que se tendrán durante la excavación:

En los primeros 40 m a partir de la margen izquierda del Río San Juan se abrirá un corte de tajo en canal en una andesita fracturada, muy intemperizada y por tanto, muy deleznable, con características de material arcilloso; estas condiciones prevalecen hasta encontrar la Falla Tula.

El emportalamiento del túnel se efectuará en caliza, excavándose para ello un tramo de 13 m (medidos horizontalmente).

Es importante considerar los problemas de caídos que ocurrirán como consecuencia del depósito de talud que cubre a las rocas volcánicas y que se presentarán principalmente en la margen izquierda; a fin de atenuar este problema se recomienda disminuir la pendiente del corte, diseñada con un valor de 0.27:1 y para la que Garrido, (1987), recomienda una pendiente del orden de 0.35:1 a 0.45:1.

Debe ponerse atención a la estabilidad de estos cortes porque se tiene proyectado un camino de acceso a la zona de obras que pasará por la cota 1 405, situada dentro del depósito de talud.

El portal de entrada está diseñado con una pendiente 0.32:1 y con una bermá de 20 m de ancho, sobre la que quedará situado el camino de acceso y las obras de cierre final.

Este diseño del portal de entrada pretende evitar la capa de roca decomprimida y de fracturamiento asociado a la Falla Tula, removiendo totalmente el afloramiento de ésta.

No se esperan problemas de estabilidad relacionados con la presencia de discontinuidades, como son la estratificación y la posición relativa de la misma con respecto a la orientación de la obra. Apparently el buzamiento de los estratos es desfavorable, pero los planos de estratificación se encuentran sellados y su inclinación es menor a los 45°.

La tabla V.2 resume los aspectos principales de la geología y geotecnia del túnel de desvío; generalmente la roca se clasificó como de buena calidad, con excepción de las zonas donde se ubicarán el canal de llamada y el camino de acceso.

ATAGUIAS.

Como se mencionó antes, parte de las obras de desvío son las ataguías, las que se construirán con materiales graduados. La ataguía de aguas arriba tendrá una altura de 30.26 m y la de aguas abajo será de 11.50 m.

Para localizar estas ataguías se consideraron principalmente las condiciones geotécnicas que prevalecen en las paredes acantiladas del Cañón del Infiernillo, en cuya parte alta corresponden a un sistema regional de fracturamiento de orientación aproximada N 10° E. Inicialmente, la posición de las ataguías se propuso a unos 50 m aguas abajo de la confluencia, pero en la actualidad se maneja la propuesta que las ubica unos 95 a 100 m aguas abajo de la posición original.

Litología.

Similar a la que se ha mencionado para las obras de la boquilla. Se presentan dolomías gris oscuro y brechas dolomíticas, en estratos cuyo espesor varía de 0.5 a 2.0 m y de textura sacaroide; los fósiles están recristalizados e irreconocibles, apreciándose también algunos rasgos de disolución como superficies lapiácicas y oquedades.

Estructuras geológicas

Se presentan dos fallas subsidiarias a la Falla Tula. Una de ellas se sitúa un poco más hacia el sur, y tiene una orientación NE-SW con un echado de 60°-70° al SE; la otra falla, situada al norte, se orienta NE-SW con 50° al NW. Entre las dos forman un pequeño horst de 70 m de longitud a la altura de la lámina de agua.

Las capas se inclinan de 10° a 15° al NW.

TABLA V.2.

GEOLOGÍA Y GEOTECNIA DEL PORTAL DE ENTRADA DEL TUNEL DE DESVIO

OBRA	DIMENSIONES		TALUD PROYECTADO	TALUD PROPUESTO	ROCA	DISCONTINUIDAD	CALIDAD	EXPLORACION ADICIONAL
Camino	Elev. 1 405	Ancho (m) 8-10			Mat. de Talud		Mala	Pozos Geofísica
Berma	1 405	2.						
Canal		Long.			Andesita Dep. de talud	Fracturamiento	Mala	
	1 383	9 m 50	0.27 : 1	0.37 a 0.45 : 1				
Portal		9			Caliza dolomítica	Estratificación	Buena	
Talud	1 383	Altura			Caliza dolomítica	Estratificación	Buena	
		22 m	0.32 : 1					
Talud	1 405	35 m	0.72 : 1		Caliza dolomítica	Estratificación	Buena	

CLASIFICACION GEOMECANICA DEL TUNEL DE DESVIO

Formación	Clasificación	Parámetro	Calidad	Comentarios
El Doctoral Calizas Dolomitizadas	NGI	Q 25.5-40.0	Buena	S = 11-16 m. (S : span o claro) Tiempo de sustentación = Permanente
Rumbo : N 12° W Echado : 15° SW Longitud : 622 m	CSIR	RMR (final) 55-69	II Buena	Ajuste para túnel: 1er tramo (-10); 2º tramo (-6), 3er tramo (-10) Tiempo de sustentación: 25-150 meses Em = 500 ton/cm ² Macizo rocoso : Cohesión = 4 kg/cm ² Fricción interna = 40°
	GEOFISICA (CFE)	Vp = 5 217 m/s Vs = 2 814 m/s δ = 2.77 g/cc	Buena	Relación de Poisson: ν = 0.29 Módulo de corte μ = 219 ton/cm ² Módulo estático de Young = 564 ton/cm ² Módulo de compresibilidad = 447 ton/cm ²

NOTA : Las clasificaciones empleadas son las siguientes:

- (1) NGI, Barton, et.al. (1980), Norwegian Geotechnical Institute
- (2) CSIR Bieniawski, (1979), Council for Scientific and Industrial Research
- (3) CFE, Comisión Federal de Electricidad.

000000

Se detectaron tres sistemas de fracturamiento:

NW 50°-60° SE
NE 50°-70° SW
E-W

Dentro del bloque hundido las fracturas y fallas están cerradas o selladas por calcita, aunque existen algunas que han sido abiertas superficialmente por disolución de la corriente.

El empotramiento de las ataguías se hará en roca sana y medianamente fracturada por el alivio de presiones en las paredes del cañón.

Las características de la zona de decompresión se obtuvieron por microsísmica y dos barrenos horizontales, y son las siguientes:

a) Espesor de roca alterada o decomprimida:

30-120 cm promedio-60 cm

Velocidad de la onda compresional:

1 000 a 2 500 m/s

b) Velocidad de la onda compresional en roca sana:

5 080 a 6 350 m/s

Por tanto, la calidad de la roca es buena.

Para estas rocas también se pueden aplicar los resultados del área de boquilla, ya que sus características físicas son similares.

La ataguía de aguas arriba recibirá un tratamiento asociado a la zona impermeable de la misma, que deberá incluir el cauce y los márgenes hasta la elevación de la corona, para los respaldos puede usarse material de derrumbe dispuesto en capas y compactado con tránsito de tractor.

V.2

VERTEDEDOR.

Esta obra cuya finalidad es verter el agua que rebasa el nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) se ubicará sobre la margen derecha del Río Moctezuma. Aunque en todos los anteproyectos se había ubicado sobre la margen izquierda, se analizó la otra opción encontrándola interesante también, (Plano II).

En la margen izquierda se había propuesto ubicarlo a 300 m del Cañón del Infiernillo, considerando un vertedor en túnel de 10 m de diámetro, con dos opciones de diferente longitud, una corta (450 m) y otra larga (610 m), cuya estructura de control estaría formada por 3 vanos que alojarían compuertas radiales.

En la margen derecha, el vertedor se ubicará a 150 m de la confluencia, donde se estudió un área aproximadamente cuadrada. También será un túnel pero de 9.50 m de diámetro y 860 m de longitud, con un "patín" a la salida y con una caída de 200 m. La estructura de control es similar a la de la opción en margen izquierda.

Litología.

Margen izquierda. Se estudió un área de aproximadamente 1.4 km², en donde se presentan dolomías color gris oscuro, en estratos de hasta 1 m, brechas dolomíticas y algunas calizas micríticas de color pardo a gris, en estratos de 0.4 a 1 m.

Hacia la esquina suroeste del área afloran depósitos de abanico aluvial, parcialmente cementados por caliche, de espesor variable y cubren en forma discordante a la Formación El Doctor. El túnel atravesaría una litología similar a la que existe en la parte superior del Área de boquillas. En la zona del desfogue o de descarga, muy arriba de la cota de salida, existe un depósito de grava de dimensiones reducidas que podrían causar algunos problemas de estabilidad.

Margen derecha. Aquí son más abundantes las calizas micríticas, color gris claro a pardo amarillento en estratos de 30 cm a casi 2 m, que presentan algunas superficies lapiácicas e intercalaciones de algunos horizontes de brechas dolomíticas.

Estructuras Geológicas.

Margen izquierda. Los estratos de la Formación El Doctor tienen un rumbo NW con echados al NE y al SW, con intensidades entre 11° y 30°. Abundan los rasgos estructurales y a veces están asociados a brechas rojo-amarillentas.

Las fracturas verticales o subverticales, se agrupan en dos sistemas:

N 45° E y N 23°-40° W

Se aprecia una serie de cantiles que quizá son reflejo de rasgos

estructurales, hasta de 20 m de altura.

De la parte central del área, hacia el norte, los planos de las fracturas, subparalelos a la topografía, provocan una serie de bloques potencialmente inestables, ya que carecen de apoyo en su parte baja.

El túnel atravesaría el flanco NE de un suave plegamiento anticlinal.

Margen derecha. Los estratos de esta margen también tienen rumbo NW, con sus echados al SE, con una intensidad de 40° a 52°. Aquí la Formación El Doctor forma el flanco de un anticlinal con rumbo NW-SE inclinado 15° a 28° al NE, y está afectada por tres sistemas de fracturamiento:

NE
E-W
NW (este es menos frecuente)

El portal de entrada se construirá evitando la Falla Tula, en roca de la Formación El Doctor, cuyos estratos se inclinan en dirección perpendicular a la orientación del túnel.

Exploración.

La alternativa de colocar el vertedor en la margen derecha es una propuesta reciente, y la exploración realizada corresponde únicamente al emportalamiento de las alternativas corta y larga propuestas para la margen izquierda.

a) Métodos indirectos.

Se levantaron 4 líneas de refracción sísmica (cuya ubicación puede verse en la figura 7-B) con 11 SEV, distribuidos como sigue:

Línea	SEV
E3-E4	3
X3-X4	4
X5-X6	3
X7-X8	-

Los resultados mostraron variaciones laterales de importancia, debidas probablemente al fracturamiento de la roca. La capa de intemperismo tiene de 4 a 5 m de espesor, seguida de una roca de calidad regular que llega hasta los 22 u 82 m, dependiendo de la alternativa, a partir de esas profundidades se tienen rocas de excelente calidad.

Las rocas más convenientes se presentan en la alternativa corta, siendo de calidad regular o excelente. En la alternativa larga se tienen superficialmente rocas de mala y muy mala calidad.

EXPLORACION GEOFISICA

Ubicación de líneas de Refracción Sísmica (Según C.F.E.)

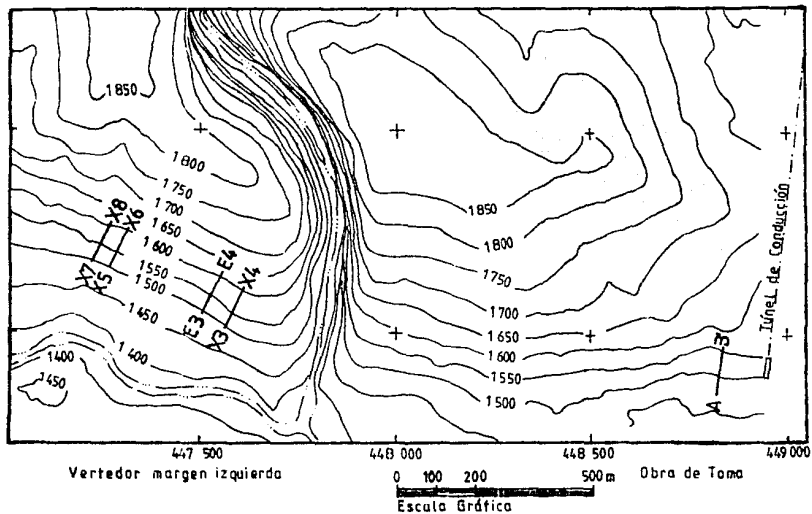


Figura 73.

Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbino
Tesis Profesional

Septiembre de 1988

Se determinaron las siguientes características para la roca de calidad regular y buena:

	Regular	Buena
Relación de Poisson	0.29	0.23 a 0.28
Módulo dinámico de corte	11 ton/cm ²	145 a 215 ton/cm ²
Módulo dinámico de Young	284 ton/cm ²	364 a 554 ton/cm ²

b) Métodos directos.

No se hizo alguna exploración adicional de este tipo; por su cercanía a la alternativa "B" del eje de cortina, se extrapolaron los resultados ahí obtenidos.

En resumen, las condiciones geotécnicas en la margen izquierda para el portal de esta obra son similares a las que se tienen para el emportalamiento del túnel de desvío; en general la calidad del macizo rocoso es buena. La alternativa larga de margen izquierda y la alternativa en margen derecha tienen condiciones similares de comportamiento. En la margen derecha se esperan deslizamientos potenciales de poca importancia.

En caso de aplicar a la margen derecha la clasificación usada en margen izquierdada, sería de esperar una menor calidad del macizo, pues la inclinación de las capas es desfavorable en el talud posterior. Para el túnel la calidad esperada sería de regular a buena, pero conviene revisar su trayectoria en la proximidad de la descarga, pues existe peligro de ocasionar inestabilidad en la pared del cañón al avanzar con la excavación.

La tabla V.3 resume la clasificación geomecánica del vertedor, para la opción en margen izquierda; en esta tabla se indica que la calidad del macizo rocoso, tanto para el canal de llamada como para el túnel, es buena y los valores para las dos obras son muy similares, pues la calidad solo mejora un poco en las rocas del túnel donde se obtuvieron velocidades de onda un poco más altas.

TABLA V.3.

CLASIFICACION GEOMECANICA DEL CANAL DE LLAMADA DEL VERTEDOR
MARGEN IZQUIERDA

Formación	Clasificación	Parámetro	Calidad	Comentarios
El Doctor Taludes canal de llamada del vertedor	NGI	σ 24.0-36.0	Buena	S = 11-15 m (S : span o claro) Tiempo de sustentación : permanente
	CSIR	RMR (final) 65 - 70	II Buena	Ajuste para túnel : -6 Tiempo de sustentación : 1-4.5 meses $E_m = 300 \text{ ton/cm}^2$ Macizo rocoso: Cohesión = 3 Fricción Interna = 35° Recomendaciones : Procedimiento de excavación : Bermas 20 x 5 m, Taludes 0.25:1 Soporte o tratamiento : Drenas
	GEOFISICA (CFE)	$V_p = 4\ 000 \text{ m/s}$ $V_s = 2\ 000 \text{ m/s}$ $\delta = 2.77 \text{ g/cc}$	Buena	Relación de Poisson $\nu = 0.25$ Módulo de corte $\mu = 145 \text{ ton/cm}^2$ Módulo estático de Young $E = 364 \text{ ton/cm}^2$ Módulo de compresibilidad $K = 246 \text{ ton/cm}^2$

CLASIFICACION GEOMECANICA DEL VERTEDOR
MARGEN IZQUIERDA

El Doctor : Calizas dolomitizadas Rumbo : N 10° W Echado : 18° SW Longitud : 600 m	NGI	σ 24 - 36	Buena	S = 11- 15 m Tiempo de sustentación : Permanente
	CSIR	RMR (final) 65 - 70	Buena	Ajuste para túnel : (-6) Tiempo de sustentación : 1-4.5 meses $E_m = 500 \text{ ton/cm}^2$ Macizo rocoso : Cohesión 3-4 Kg/cm ² Fricción Interna = 37° Recomendaciones : Procedimiento de excavación : frente completo Soporte o tratamiento : Anclas 3 a 2.5 m long. en la clave. Malla de alambre ocasional $\phi = 1"$
	GEOFISICA (CFE)	$V_p = 4\ 200 \text{ m/s}$ $V_s = 2\ 500 \text{ m/s}$ $\delta = 2.77 \text{ g/cc}$	Buena	Relación de Poisson $\nu = 0.23$ Módulo de corte $\mu = 174 \text{ ton/cm}^2$ Módulo estático de Young $E = 429 \text{ ton/cm}^2$ Módulo de compresibilidad $K = 240 \text{ ton/cm}^2$

NOTA : Las clasificaciones empleadas fueron:
NGI, Barton, et.al. (1980), Norwegian Geotechnical Institute
CSIR, Bieniawski, (1979), Council for Scientific and Industrial Research
CFE, Comisión Federal de Electricidad

V.3. OBRA DE TOMA

El túnel de conducción, de orientación N 7° 46'E se ubica sobre la margen derecha del Río Moctezuma, obligando a que la obra de toma se sitúe sobre la misma margen, puesto que es una obra auxiliar supeditada a la ubicación de la obra principal, (Plano III).

La obra de toma se diseñó para manejar un gasto de 57 m³/s que corresponde al máximo valor que se manejará en el túnel de conducción. La obra de toma estará integrada por un canal de llamada diseñado para obtener velocidades mínimas de 1.25 m/s, contará con rejillas de 5.31 x 12.64 m y dos juegos de compuertas deslizantes tipo vagón, uno de servicios y otro de emergencias.

El canal de llamada se sitúa a 1 200 m de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, a una cota que puede variar de 1 505 a 1 525 m en función de la altura de cortina elegida.

Litología.

Se estudió un área de aproximadamente 6.5 km², en la que se encontraron rocas de la Formación El Doctor, pequeños afloramientos de andesitas y depósitos de gravas cementadas por caliche.

Las calizas de la Formación El Doctor, generalmente sin fauna, se presentan en estratos de 20 cm a 1 m, son de color gris claro cuando están frescas, e intemperizan a un tono pardo amarillento, ocasionalmente presentan superficies lapiácicas y conglomerados y brechas dolomíticas.

Los afloramientos de andesitas de color amarillo son escasos y se encuentran intemperizados.

En lo que respecta a los depósitos de gravas, se clasificaron atendiendo a su origen asociado a la topografía; en la zona de la Falla Tula son abanicos aluviales mientras que en el resto del área se han clasificado como suelos aluviales gravosos.

Estructuras Geológicas

Casi todos los estratos buzan hacia el SW, excepto en la esquina suroeste, donde buzan hacia el NE, llegando a presentarse, inclusive, en posición vertical.

Existen varias fallas normales además de la Falla Tula, aunque son de dimensiones menores a ella. Su orientación es aproximadamente E-W. En la parte central del Área se forma un pequeño graben, sobre la Formación El Doctor. La disposición general de los planos de falla manifiesta una inclinación entre 60° y 80° al NE, y están bien expuestos.

También se presentan varias fracturas, poco continuas, aunque bien definidas.

Exploración.

a) METODOS INDIRECTOS: se llevó a cabo exploración indirecta del subsuelo en un área cercana (Figura 7-B), situada a unos 120 m al poniente de la propuesta actual, haciendo uso del método de refracción sísmica, enfocado a determinar los módulos elásticos. Además, se efectuaron 4 SEV cuya separación máxima fue de 215 m.

Se determinaron tres capas de roca de regular a excelente calidad. La roca de calidad regular corresponde a la capa superficial intemperizada, cuyo espesor varía de 8 a 18 m.

Se obtuvieron los siguientes valores para los módulos:

	Roca buena	Roca regular
Relación de Poisson	0.28	0.30
Módulo dinámico de corte	139 ton/cm ²	56 ton/cm ²
Módulo dinámico de Young (€)	357 ton/cm ²	146 ton/cm ²

En la zona estudiada la calidad del macizo rocoso se consideró buena, siempre y cuando la altura del piso de la obra no rebase la cota 1 500 en la nueva área, en cuyo caso la calidad de la roca sería ligeramente inferior, debido a la presencia de las fallas que afectan esta área.

En resumen, la calidad del macizo rocoso aquí es inferior a la que se tiene en la zona de la boquilla, pero la variación no es considerable por lo que no son de esperar problemas geotécnicos.

No se efectuaron barrenaciones ni otras pruebas de mecánica de rocas.

La tabla V.4 resume la clasificación geomecánica de Obra de Toma, en ella se indica que la calidad del macizo rocoso es regular o media, como era de esperarse considerando los resultados de la exploración geofísica en el área vecina.

TABLA V.4.

CLASIFICACION GEOMECANICA DE OBRA DE TOMA

De acuerdo con Bieniawski, (1979)

Formación : Taludes en la obra de toma
Calizas dolomitizadas de la unidad U₂ en la conducción
Rumbo : N 12° W
Echado : 15° SW

RMR : 60-72

Clase : III Media

Macizo rocoso : Cohesión 4 Kg/cm²
Fricción interna = 39°

Estabilidad : 6 - 8 meses

Claro : 5 - 7.5 m

Recomendaciones :

Procedimiento de excavación : Bermas 20 x 5 m, Taludes 0.25:1

Em (calculado) : 440 ton/cm²

Soporte o tratamiento : Drenes

V.4. EMBALSE.

El embalse se desarrollará sobre parte de las cuencas de los ríos Tula y San Juan, ocupando una extensión máxima aproximada de 22 km², lo que implica que la capacidad máxima de operación (NAMO) será de 1 060 millones de metros cúbicos (Mm³).

Por el lado del Río Tula las aguas del vaso se extenderán 12 km llegando hasta las cercanías del puente de Tasquillo, en tanto que en el Río San Juan las aguas llegarán 14 km río arriba, a partir de la confluencia.

El único poblado de importancia que se verá afectado cuando se inunde el vaso hasta el NAME, será Rancho Nuevo, que cuenta con más de 1 000 habitantes y con tierras fértiles.

Litología.

De acuerdo a sus características geológicas es posible delimitar dos áreas, una desde la cola del embalse en el Río San Juan hasta el poblado de La Vega y la otra desde ahí hasta la cola del embalse sobre el Río Tula.

La primera zona es bastante homogénea tanto litológica como estructuralmente, por lo que al cruzarla el Río San Juan corta y expone en ambas márgenes una potente secuencia de rocas volcánicas básicas, en las que predominan coladas de basalto con un espesor de 3 a 12 m, con emisiones intercaladas de pumicita, cuyo espesor es de 10 a 20 cm y en ocasiones llegan a presentarse grandes cuerpos de brecha volcánica.

La base de la secuencia está representada por una brecha volcánica bien compacta pero que se vuelve muy deleznable cuando está alterada y cuyos fragmentos tienen diámetros variables entre unos cuantos centímetros hasta más de un metro; la matriz es fina, de colores pardo, naranja, gris morado e incluso blanquecino.

Encima de esta brecha se encuentra una serie de coladas de basalto masivo y compacto, de textura vesicular o amigdaloides, siendo el relleno de las amígdalas de calcita y zeolitas. La estructura de éste basalto es lajeada, pero también se presenta columnar y su coloración varía de quinda a negro. Es posible distinguir por lo menos ocho derrames (como en el área de La Vega, donde afloran estos derrames con sus tobas y brechas asociadas).

La cima de la secuencia la constituye un depósito de arenas volcánicas, grava y lapilli, cubierto parcialmente por un derrame de basalto de poco espesor (50 cm a 1 m).

La secuencia se encuentra en su posición original de depósito, ligeramente afectada por algunos asentamientos y probablemente por la Falla La Florida. Se considera que toda la secuencia se formó durante el Plioceno a través de volcanes actualmente inactivos, como son

Uxdejhé, El Charco, del Río Cajón, El Chinfi y El Llano. Las paredes más abruptas presentan evidencias de fallas de talud de pequeña magnitud.

El Área que se extiende desde La Vega hasta la cola del embalse, cerca del puente de Tasquillo, manifiesta una gran complejidad litológica y estructural; está compuesta por rocas sedimentarias mesozoicas, volcánicas terciarias de composición variable y depósitos recientes.

Haciendo la descripción de poniente a oriente y de acuerdo al Informe Geológico Final, C.F.E. (1985), afloran en primer término, en ambas márgenes, rocas de la Formación Soyatal-Méndez, constituidas por calizas y lutitas calcáreas de estratificación delgada, mostrando un plegamiento intenso y cabalgaduras de escasa magnitud.

En Rancho Nuevo y hacia el norte del poblado, la Formación Soyatal está cubierta por una costra irregular de gravas y gravas arenosas cementadas por caliche, siendo este material reciente y más arenoso hacia el NW del poblado, sobre el arroyo y aumentando su espesor hacia esa parte.

Inmediatamente al sur de la confluencia de los ríos Tula y San Juan aflora una secuencia volcánica de composición intermedia, formada por tobas, derrames y brechas, con las capas inclinadas con bastante intensidad (47°) hacia el NE, que constituyen un paquete de rocas en posición potencialmente inestable cuyo comportamiento geomecánico se discutirá más adelante.

Enseguida, en la parte alta de la margen derecha del Río Tula y en la izquierda del Río San Juan afloran rocas de la Formación El Doctor, que son brechas dolomíticas y dolomias en la base, mientras que en la cima se presentan capas de caliza micrítica con intercalaciones de delgadas capas de arcillas.

Agua arriba del Río Tula predomina en ambas márgenes la secuencia volcánica intermedia de que se habló. A partir de la confluencia del Río Tula con el arroyo Tequesquite afloran nuevamente, en una extensión de 1 km, rocas de la Formación El Doctor.

A continuación afloran rocas calcáreo-arcillosas de la Formación Soyatal en una longitud aproximada de 3.5 km, hasta una curva pronunciada en donde ocurre el primer afloramiento de rocas volcánicas ácidas constituidas por dacitas, riolitas y sus correspondientes tobas y brechas que se extienden hasta la cola del embalse, con dos áreas intermedias en las que afloran rocas de la Formación El Doctor.

Estructuras Geológicas.

Los rasgos más prominentes en el Área corresponden a las fallas normales de Tula y La Florida, ambas con su bloque caído situado al sur; además el material volcánico presenta fallamiento paralelo a esos dos importantes rasgos estructurales, aparte de un intenso

fracturamiento.

La Falla Tula tiene relleno arcilloso y un respaldo de dolomías, por lo que puede considerarse como impermeable.

Es importante hacer notar que existe una gran cantidad de bloques rodados, particularmente en el área cercana al puente sobre el Río Tula, que aunque son de pequeño volumen, generalmente menores a 1 m, están en continuo desplazamiento. Se observa el mismo fenómeno, frente al Cañón del Infiernillo, aunque con menor intensidad.

Exploración.

Después de analizar la geología del embalse se concluyó que no tendrá problemas de estanqueidad, pues la existencia de las rocas impermeables subyacentes de la Formación Soyatal permiten asegurarlo. Sin embargo, para el bloque potencialmente inestable que se localiza al sur de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, que abarca un área de unos 2 km², y para el que Palacios-Nieto, M., (1982) estimó un espesor de 300 m, se requirió de una exploración adicional más detallada, ya que puede ocasionar serios problemas, que según el mismo autor son los siguientes:

- Saturación.
- Pérdida del ángulo de fricción interna de sus componentes.
- Aumento de volumen por absorción de agua del vaso.
- Deslizamientos (instantáneo o lento) según uno o varios planos.
- Volumen que comprende dicho bloque y sus consecuencias: azolve y sobrecarga de esfuerzos en la cortina.

a) METODOS INDIRECTOS: Se efectuó un estudio geofísico (Díaz-Molinari, 1982), con el procedimiento y resultados que se exponen en seguida (Figura 8).

Se tendió una línea de 563 m de longitud sobre la cual se distribuyeron 4 SEV tipo Schlumberger, separados 200 m entre sí, con aberturas electródicas A/B entre 10 y 500 m (sondeos 1 y 2), entre 10 y 750 m (sondeo 3) y entre 10 y 1 000 m (sondeo 4).

También se utilizó el método sísmico de refracción, con dos tendidos:

Tendido 1 (T1). Con una longitud de 390 m, con 12 geófonos colocados cada 30 m.

Tendido 2 (T2). Constó de 24 geófonos colocados cada 15 m.

La ubicación de los tendidos para SEV y refracción sísmica aparecen en la figura No.8.

Se determinaron 7 tipos de distinta respuesta geoelectrica:

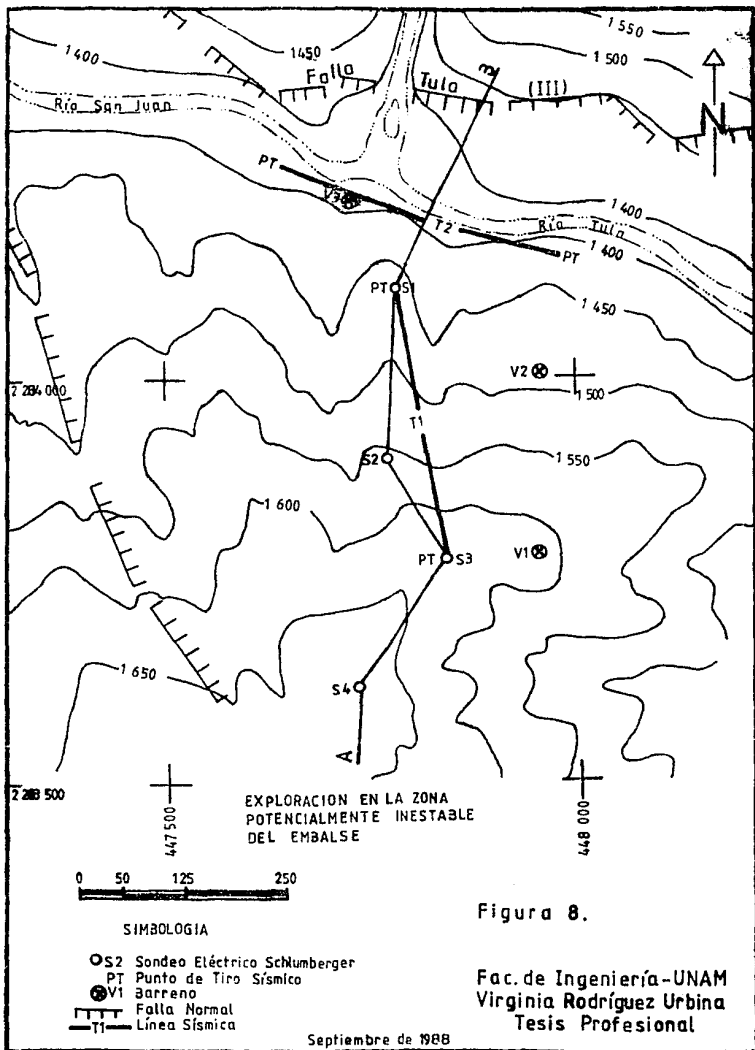


Figura 8.

Fac. de Ingeniería-UNAM
Virginia Rodríguez Urbina
Tesis Profesional

Una capa superficial de intemperismo, con espesor promedio de 20 m y resistividades entre 34 y 135 Ω -m, cuya velocidad de onda compresional (V_p) fue de 455 a 635 m/s.

- Una capa de roca subsiguiente, con bajos valores de resistividad, entre 7 y 14 Ω m, correlacionable con material tobáceo, con espesores de 140, 170, 280 y 404 m, determinados en los SEV 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Las velocidades de onda compresional fueron de 2 010 m/s en el tendido T1 y de 3 081 m/s en el T2.

- Otra capa geoelectrónica de resistividades un poco más altas, de 48 a 350 Ω -m, en la que no se obtuvieron velocidades sísmicas por falta de penetración de la energía desde la superficie, debido al alto grado de intemperismo de la capa superior. Esta capa puede correlacionarse con la Formación Soyatal, pues el barrenos V-3 encontró dicha formación a la cota 1 265.55 msnm, o sea a 120.45 m de profundidad, así como también los barrenos 4-6 y 5-7 perforados en la boquilla.

En resumen, la capa de intemperismo aumenta desde la margen izquierda del Río Tula de 3.9-4.5 m hasta 25 y 41 m en los SEV 3 y 4 respectivamente; como el agua del embalse estará por debajo de la cota 1 600 no se cubrirá la zona más intemperizada.

Se considera que el material es fácilmente erosionable pudiendo ocasionar posteriores deslizamientos con cotas superiores al nivel de aguas del vaso.

Además, en octubre de 1983 se realizó otro estudio en la misma área, en el que se proponen evidencias que postulan una falla de tipo normal dentro de la secuencia volcánica.

Las secciones orientadas E-W coinciden en general con la sección N-S.

b) METODOS DIRECTOS. Se hicieron tres barrenos V-1, V-2 y V-3, con recuperación de núcleos, y que totalizaron 402 m.

A causa de la mala calidad de la roca fue necesario ademar o cementar un tramo considerable dentro de los primeros 100 m de cada barrenos.

El barrenos V-3 alcanzó a cortar unos 10 m de la Formación Soyatal, ubicando el contacto a los 120.45 m de profundidad.

Los núcleos recuperados de la secuencia volcánica permitieron identificar una secuencia intercalada de derrames y tobas andesíticas color rojizo, con fracturamiento intenso. En ocasiones, los derrames presentaron textura vesicular o amigdaloidal y están asociados a tobas arenosas y arcillas, sobre todo en la parte alta y en las cercanías del contacto con las rocas mesozoicas.

En lo que a porcentaje de recuperación se refiere, fue generalmente bajo; en el barrenos V-1 fue menor al 20%, en el V-2 fue casi nulo, en

el V-3 tuvo un promedio inferior al 10%, con tramos muy largos en que resultó nulo y solo mejoró al alcanzar la Formación Soyatal, pero sin ser nunca mayor al 35%.

En muchas ocasiones la muestra se recuperó totalmente desintegrada.

No se realizaron pruebas de permeabilidad, pero el nivel freático se detectó en V-2 y V-3 a 80.5 y 4.5 m de profundidad respectivamente, es decir a la cota 1 382 un poco arriba del nivel del río.

Mecánica de Rocas.

De acuerdo al estudio de mecánica de rocas, esta zona solo es inestable bajo condiciones críticas y no se considera de mayor peligro.

A manera de conclusión, se considera que por su posición geométrica dentro del embalse y por su RQD tan bajo, estas rocas de mala calidad deben recibir algún tratamiento para garantizar su estabilidad y que no se desintegren al contacto con las aguas residuales, ocasionando azolve parcial en el embalse.

TABLA V.5.

P. H. ZIMAPAN.

EXPLORACION DIRECTA DEL SUBSUELO.

BARRENO No.	LOCALIZACION		PRUEBAS DE PERMEABILIDAD LUGEON.	Recuperación de muestras	Elevación Nivel Freático m.s.n.m.	Profundidad o longitud total (m)	C O O R D E N A D A S:			Observaciones: m.s.n.m.	
	M. I.	M. D.					X	Y	Z		
ZONA DE BOQUILLA											
1ª Etapa											
1		x	x	si	20°	1 379.05	120.10	447 814.690	2 284 327.270	1 379.600	1 357.950
2		"	x	si	20°	1 379.50	120.45	447 775.990	2 284 351.990	1 380.840	1 359.110
3	x		x	si		1 373.69	100.95	447 786.020	2 284 461.710	1 387.070	
4	x		x	si		1 371.46	119.70	447 815.040	2 284 650.520	1 382.960	1 347.010
5		x	x	si		1 372.92	120.20	447 867.634	2 284 643.562	1 383.321	1 356.220
6	x		x	si		1 376.80	120.00	447 756.280	2 284 653.600	1 384.000	1 342.500
7		x	x	si		1 370.42	112.20	447 928.990	2 284 638.190	1 384.520	1 366.020
8	"		x	si		1 376.87	169.00	447 767.480	2 284 656.210	1 526.970	
9	"		x	si	50°	1 374.40	70.55	447 817.285	2 284 650.909	1 383.006	1 355.000
10	x		x	si			170.15	447 706.800	2 284 661.420	1 528.088	
11		x	x	si			176.00	447 893.058	2 284 637.870	1 526.843	1 361.000
12		x	x	si	45°	1 379.94	70.60	447 865.798	2 284 642.117	1 383.386	1 354.000
13		x	x	si			162.20	447 952.733	2 284 636.070	1 528.035	
16	x		"	si			81.15	447 767.380	2 284 656.210	1 526.870	
Socavón 1	"		"				100.00	447 828.790	2 284 647.120	1 382.770	
Socavón 2		x					100.00	447 858.680	2 284 644.540	1 383.220	
Socavón 3	"						100.00	447 778.410	2 284 651.610	1 526.640	
Socavón 4		x					100.00	447 883.010	2 284 642.280	1 526.630	
2ª Etapa											
E2-1	x		x	si			120.00	447 845.395	2 284 741.401	1 383.802	1 325.502
E2-2	x										
E2-3	x										
ZONA DEL EMBALSE (VASO)											
V-1			x	si			102.00	447 943.620	2 283 782.110	1 610.910	
V-2				no		1 382.00	170.15	447 944.220	2 284 055.970	1 663.070	
V-3				si		1 381.54	123.80	447 739.870	2 284 238.230	1 386.290	

CAP. VI. BANCOS DE MATERIALES.

Se expone de una manera general el procedimiento seguido para elegir áreas con posibilidades de ser empleadas como bancos de materiales.

En primer término se señalaron siete áreas cercanas a las zonas de obras (Figura 9), sobre los arroyos más importantes, cuyas características se ilustran en la tabla siguiente:

BANCO	AREA (m ²)	VOLUMEN (m ³)	OBSERVACIONES
El Paraje	17 200	27 497	Agregados de calidad regular.
Mathé	75 800	122 497	Agregados de buena calidad.
El Carrizo	38 200	43 730	Agregados de buena calidad.
El Morro	10 904	133 028	
El Comalito	14 600	5 110	
La Rueda	1 600	960	
Taguá El Grande	1 050	2 100	Limos de mala calidad.

Por su extensión resultaron de interés los tres primeros, y por su cercanía El Comalito.

Entre 1983 y 1984, C.F.E. efectuó muestreos en las Áreas de interés con la finalidad de hacer estudios petrográficos (con microscopio estereoscópico y petrográfico) y granulométricos, además de realizar algunas inmersiones en líquidos (aceites) de índice de refracción conocido para identificación de los componentes. Las tablas que se incluyen en el Anexo II resumen los resultados obtenidos.

De esas tablas puede verse que las localidades muestreadas contienen reactivos a los álcalis del cemento. Los materiales de los arroyos Mathé y El Carrizo tienen una calidad petrográfica aceptable, pero en El Carrizo existe un agregado fino de calidad media, mientras que los materiales de los otros dos arroyos no pueden ser usados como agregados del concreto por sus características físicas y sus componentes. Se concluye que no existen bancos de materiales de calidad aceptable en los alrededores del P.H. Zimapan.

Como alternativa, se podría recurrir a las calizas que afloran en las cercanías de la boquilla, tanto al oriente como al poniente, para obtener los tamaños deseados en los agregados gruesos y finos es necesario fragmentar estas calizas. Existen zonas topográfica y litológicamente propicias para explotar pedreras sin restricción

alguna.

Otra alternativa para obtener agregados para el concreto es utilizar el material de rezaña de las excavaciones para emplazar las obras civiles. Este material debidamente tratado también sería una fuente alterna de aprovisionamiento de materiales, e implicaría un transporte mínimo.

Los volúmenes de materiales que se han calculado para todo el proyecto son los siguientes:

Concreto (m ³)	-----	561 381
Cemento (ton)	-----	230 166
Arena (m ³)	-----	
Grava (m ³)	-----	398 580

Estos materiales están calculados considerando que el concreto alcanzará una resistencia $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$.

Para obtener ese valor, se estima una proporción volumétrica promedio para los concretos de:

Cemento:	1.00
Arena:	1.75
Grava:	2.50

Con un consumo promedio por m³:

Cemento:	0.410 ton
Arena:	0.480 m ³
Grava:	0.710 m ³

UBICACION DE PROBABLES BANCOS DE MATERIALES

(Según C.E.E., 1985).

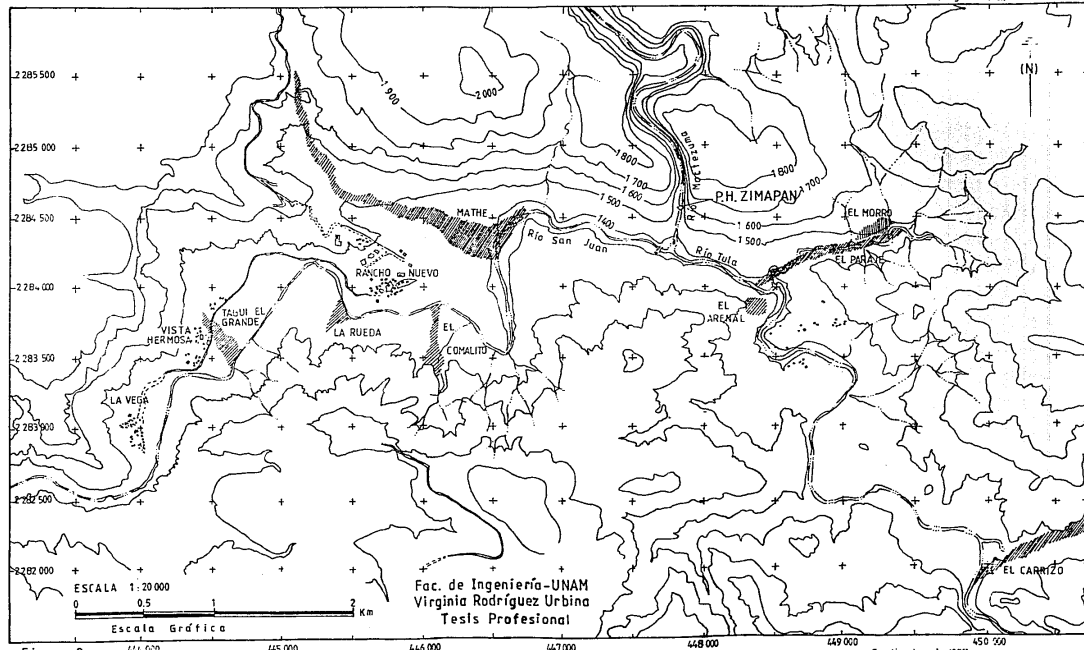


Figura 9.

Septiembre de 1988

En la práctica de la ingeniería se define al riesgo sísmico en función de la probabilidad de que se genere un sismo en cualquiera de las fuentes potencialmente sísmicas de la vecindad, asumiendo además que el riesgo sísmico debe ser medido por la más alta intensidad que pueda ser causada en el sitio (y durante la vida útil de la obra) por el terremoto de mayor magnitud (Esteve-M.L., 1975). Se define pues, en términos de las relaciones entre intensidades sísmicas y sus periodos de recurrencia. Conviene mencionar que no siempre los sistemas de ingeniería pueden ser diseñados para la condición más desfavorable que se espera pueda presentarse.

A menudo los términos empleados al hablar de éste tema son ambiguos y causan confusión, por lo que conviene establecerlos brevemente:

Sismología. - Dowrick, D.J., (1977) la define como la ciencia que estudia los sismos, sus causas, efectos y fenómenos asociados.

Sismicidad. - En sentido estricto se define como "...la frecuencia de sismos por unidad de Área en una región dada", aunque frecuentemente se acuno como "...la actividad sísmica de una región dada".

Intensidad. - Medida subjetiva de los efectos de un sismo. Se refiere a "qué tan fuerte se siente la sacudida" en un sitio determinado, y esto varía de lugar a lugar. Para cuantificarla se emplean las escalas de Mercalli (modificada: MM) y la de Rossi & Forel.

Magnitud (M). - Cuantifica "el tamaño" de un sismo independientemente del lugar de observación. Se calcula a partir de la amplitud medida en sismogramas y se expresa en escala logarítmica, en números enteros y decimales; la escala más usada para medir la magnitud es la de Richter, en la que M se define como:

$$M = \log A - \log A_0$$

donde:

- A es la máxima amplitud registrada para un evento sísmico dado.
- A_0 es aquel sismo particular seleccionado como estándar y da el valor mínimo que puede causar daño a una estructura alojada en una cierta región.

Para proceder a evaluar el riesgo sísmico es necesario efectuar un estudio previo de la sismicidad de la zona de interés, en el que se consideren los siguientes aspectos:

- Evidencias que aporta la geología regional
- Distribución de eventos sísmicos
- Estudios esfuerzo-deformación (strain-release)
- Estimaciones estadísticas de los parámetros de diseño, como son los periodos de recurrencia para magnitud y aceleración.

Las evidencias geológicas proporcionan una valiosa herramienta en la evaluación del riesgo sísmico, ayudan a estimar la probable magnitud de un sismo, su localización y la frecuencia con que puede presentarse el mismo.

Al analizar las deformaciones tectónicas debe determinarse su naturaleza, posición, edad e historia de los movimientos.

Entre las evidencias geológicas más importantes se tienen las siguientes:

- Inclinación de los estratos: da una idea de la intensidad de la actividad tectónica y del tiempo en que ocurrió.

- Fallas: las fallas activas son la principal fuente de información para el riesgo sísmico ya que son relativamente fáciles de describir, además de que en ellas pueden detectarse movimientos muy pequeños. Las fallas están asociadas a los focos de liberación de energía en la mayoría de los sismos.

Las fallas se clasifican, para fines de evaluación de riesgo sísmico, en activas e inactivas. Para saber si existe actividad en una zona de falla se hace una inspección del sitio, observando si existen o no depósitos recientes afectados por la propia falla. La clasificación de una falla en activa e inactiva, es hasta cierto punto, arbitraria y depende de la capacidad del geólogo para apreciar la historia de sus movimientos.

Dowrick, D.J., (1977), estima conveniente considerar como activas aquellas fallas que han acusado movimiento en los pasados 35 000 años, pero puede variar mucho el rango de consideración, pues en el caso de plantas nucleares una falla puede ser considerada activa si se ha movido en el lapso de unos 500 000 años.

- Estructuras tectónicas: de ellas depende en gran medida la actividad sísmica de una región dada y como ejemplo de ellas pueden citarse las fosas submarinas de las zonas de subducción.

En el caso del P.H. Zimapán existen evidencias de que en el pasado hubo una fuerte actividad tectónica, pero también de que actualmente esa tectónica no es activa; la zona del proyecto se ubica, según la regionalización sísmica de México para fines de ingeniería, (Esteve, M.L., 1970), en la provincia No. 15 (en la zona de baja sísmicidad) muy cerca del límite entre las zonas asísmica y penesísmica. La actividad histórica reportada implica sísmicidad poco frecuente como cabe esperar de la regionalización.

Para el estudio del riesgo sísmico del P.H. Zimapán, personal de C.F.E. efectuó una recopilación bibliográfica de datos sobre eventos sísmicos, misma que se ilustra en la fig. No.10 y se resume en las tablas VII.1 y VII.2 en las que se da consideración a las estructuras geológicas locales y regionales.

Para elaborar las tablas se seleccionaron las estructuras geológicas que podrían representar algún peligro para el P.H. Zimapán, y se le asignó a cada una el sismo máximo creíble para determinar su efecto en el Área de la cortina.

Desde el punto de vista regional Uribe, C., (1985), calcula aceleraciones de 0.04 y 0.07 g para periodos de recurrencia de 100 y 500 años respectivamente; como los sismos registrados en ningún caso exceden los valores obtenidos de la regionalización podrían ser los definitivos si no existieran estructuras geológicas locales.

Haciendo los ajustes que corresponden a las condiciones locales, considerando la velocidad de onda del sitio (entre 4.6 y 6.6 km/s) que indican materiales excepcionalmente fuertes, puede aplicarse el factor 0.67 para incluir los efectos del lugar.

Los rasgos geológicos potencialmente más peligrosos para la vida del proyecto se estudiaron con detalle, y son los siguientes:

Falla El Doctor (I). Tiene 25 km de longitud en superficie, un salto calculado de 8 km (como esta falla termina abruptamente en el extremo SW, sus dimensiones solo son inferidas) y ángulo de buzamiento de 17°; el sismo máximo creíble para ella es de 6.5 y su punto más cercano al sitio de la cortina está a profundidad y a una distancia de 3.2 km.

Uribe, C., (1985) estima una aceleración máxima en el sitio de 0.21 g.

Se trabajaron cuatro secciones en el sector Daxhi-Bothiñá con la finalidad de establecer si las fallas El Doctor y Daxhi corresponden al mismo rasgo estructural. No se encontraron evidencias para afirmar que se trata de una misma estructura geológica, pero tampoco para negarla. La cabalgadura y las fallas normales no afectan al paquete volcánico entre ambas fallas, por lo que se considera inactiva.

Fallas X y XI. Para saber si estas fallas corresponden a un mismo rasgo estructural se trabajaron 3 secciones en el sector Aljibes, encontrándose evidencias que indican que probablemente estos segmentos son parte de un mismo rasgo estructural que fue desplazado por un sistema de fallas perpendiculares. Tomando como base las estimaciones de Uribe, C., (1985) se le podría asignar a esta falla el valor de 0.15 g, pero tampoco es activa.

Falla Tula. De ser activa sería la estructura más peligrosa, pues las dos anteriores son inactivas. De acuerdo a lo estimado por Uribe, C., (1985), se concluye que la aceleración máxima resultaría de 0.12 g, misma que nos define el factor de diseño.

SISMOS CONSIDERADOS PARA EL ANALISIS DE RIESGO SISMICO EN EL P.H. ZIMAPAN

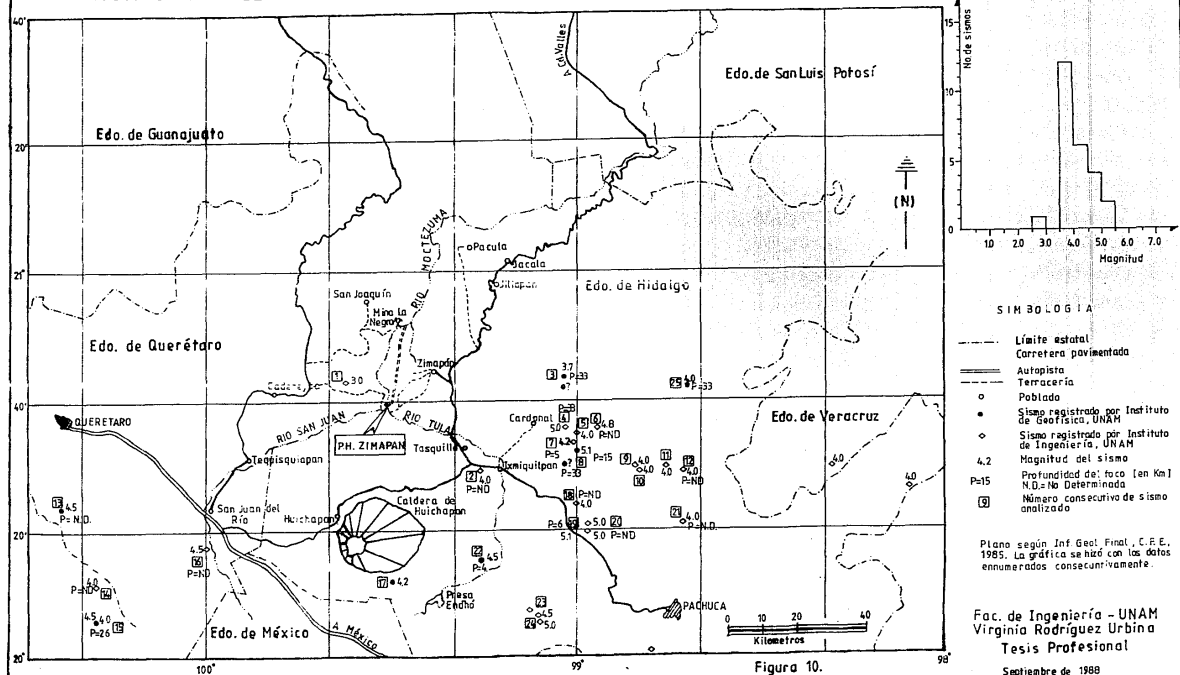


Figura 10.

TABLA VII.1

SISMICIDAD REGISTRADA EN EL AREA COMPRENDIDA ENTRE 99° y 100° LONGITUD W
y 20° y 21° LATITUD N.

No.	Fecha	Latitud	Longitud	Distancia (km)	Magnitud (Richter)	Aceleración (g)
1				49.0	3.7	0.006
2				50.0	5.0	0.019
3				50.0	4.2	0.009
4				61.2	5.1	0.016
5				74.0	5.0	0.009
6		20.720	99.630	13.0	3.0	0.014
7		20.508	99.294	32.0	4.0	0.013
8	14/10/48	20.117	99.283	67.0	4.5	0.009
9	8/02/49	20.117	99.283	67.0	4.5	0.009
10	11/03/50	20.350	98.980	67.0	5.0	0.014
11	15/08/56	20.117	99.833	72.0	4.0	0.005
12	14/02/84	20.012	99.703	77.0	2.4	0.001
13	23/07/84	20.040	100.010	90.0	2.8	0.002
14	21/12/84	20.674	99.068	43.0	3.4	0.006

Tabla No. tomada del Informe Geológico final, Etapa de Factibilidad, C.F.E., (1985).

Notas: La actividad en ésta área es escasa y no hay evidencia histórica de eventos mayores a 5.5; se considera que magnitudes < 5.0 son generalmente de poco significado en el diseño, ya que no ocasionan daños, o bien, son daños menores.
La máxima aceleración de sismos bien localizados corresponde al evento No. 10, con $g = 0.014$.

TABLA VII.2.

RIESGO SISMICO

ESTRUCTURAS GEOLOGICAS LOCALES Y REGIONALES

Falla	Buzam.	Dist.Min. (Km)	Dist.Horiz. (Km)	Long. (Km)	Prof. (Km)	Magnitud	Aceleración Campbell, B1
I	19.0°	3.20	7.30	25.00	8.00	6.50*	0.31-0.21
II	23.5°	5.30	12.20	12.00	3.00	5.90*	0.15-0.10
III	74.1°	0.40	0.40	5.00	1.20	2.10	0.17-0.12
IV	≈90.0°	14.40	14.40	17.50	4.00	6.10*	0.15-0.10
V	≈90.0°	2.90	2.90	5.00	1.00	2.10	0.03-0.02
VI	80.0°	2.20	2.20	3.50	0.80	1.60	0.03-0.02
VII	78.0°	1.30	1.30	2.30	0.80	1.10	0.03-0.02
VIII	≈90.0°	8.70	8.70	4.50	0.80	2.00	0.01-0.01
IX		9.50	9.50	3.70	0.50	1.70	0.01-0.01
X		5.50	5.50	10.50	1.50	3.10	0.04-0.03
						5.60*	0.22-0.15
XI	≈90.0°	5.00	5.00	3.50	0.80	1.60	0.01-0.01
XII	82.0°	15.70	15.70	9.00	1.30	2.90	0.01-0.01
XIII	≈90.0°	0.18	0.18	1.00	0.40	0.01	0.09-0.06
XIV	≈90.0°	0.29	0.29	0.55	0.35	0.01	0.03-0.02

NOTA: Las magnitudes marcadas con (*) son calculadas de acuerdo con Singh, K., (1980), el resto se calculó de acuerdo con Kanamori, (1975).
Estos datos se tomaron del Informe Geológico Final, C.F.E., (1985).

CAP. VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Pese a la complicada evolución geológica de la región, se tienen bien localizadas las estructuras potencialmente problemáticas o peligrosas para el P.H. Zimapán.

Han sido analizados todos los puntos de vista para la evaluación del proyecto y todos resultaron favorables:

- **Aspecto geotécnico.** En general la calidad del macizo rocoso es buena a excelente, con pocas áreas de menor calidad para las que se plantean soluciones adecuadas.

- **Aspecto constructivo.** Aunque en México se tiene poca experiencia en la construcción de cortinas de concreto, no se esperan problemas mayores. Es de particular importancia que una presa de esta altura (aproximadamente 200 m) tenga una corona de tan corta longitud (≈ 99 m), lo que resultó en un gran ahorro de recursos.

- **Aspecto socio-económico.** De todos los proyectos de este tipo que la C.F.E. tiene en etapa de factibilidad, el P.H. Zimapán resulta interesante por su costo-beneficio y por su cercanía a los centros de consumo.

Es necesario puntualizar algunos datos importantes en cada sitio de obra:

Cortina. Para lograr su empotramiento será necesario remover la roca decomprimida y excavar algunos taludes. Para garantizar una adecuada pantalla de impermeabilización se recomienda un tratamiento de por lo menos 10 m abajo del contacto El Doctor-Soyatal.

Ataguías. Son las estructuras que menos problemas presentarán pues su empotramiento se hará en roca sana y medianamente fracturada. La ataguía de aguas arriba debe ser colocada dentro del macizo rocoso delimitado por las fallas El Cajón y Tula, para facilitar el acceso al recinto de la cortina y la comunicación entre ambas márgenes. La ataguía de aguas abajo debe colocarse lo más cerca posible a la cortina para no aumentar la longitud del túnel de desvío.

Vertedor. Se recomiendan estudios de detalle para la opción en margen derecha de esta obra, en particular, se sugiere explorar con el método de refracción sísmica. En caso de elegir la opción en margen izquierda se sugiere la alternativa corta pues ahí la calidad del macizo rocoso es mejor.

Obra de desvío. Particular atención debe recibir la margen izquierda del emportalamiento del túnel de desvío, pues el depósito de talud que ahí se encuentra ocasionará derrumbes; por ello se recomienda usar cortes con pendientes de 0.35:1 hasta 0.45:1, para no crear problemas de inestabilidad al camino de acceso que se tiene proyectado a la cota + 405. El túnel se excavará en roca de buena calidad.

Obra de toma. La exploración a detalle se efectuó en una área cercana a la propuesta actualmente, encontrándose que el macizo rocoso es de calidad regular a excelente. En la zona de la nueva propuesta se espera una menor calidad de la roca a causa del fallamiento que ahí existe. Se recomiendan estudios a detalle en la nueva área.

Los emportalamientos del túnel de desvío, vertedor y obra de toma (túnel de conducción) se han programado sobre la traza de la Falla Tula o después de ella, en sitios donde la calidad de la roca lo permite; de esta manera se evita encontrar dicha falla durante el avance de la excavación, pues tiene un buzamiento hacia el sur. Lo anterior permite también evitar la capa de roca decomprimida y de fracturamiento asociado a la falla, por lo que hay que removerla, cuando sea necesario. Por tanto, los problemas se limitan a la zona del emportalamiento.

Embalse. El vaso es estanco. No presenta problemas, a excepción del paquete de rocas volcánicas potencialmente inestable bajo condiciones críticas.

Materiales de construcción. No se cuenta de manera natural con los materiales necesarios para las obras, pero pueden obtenerse con facilidad de sitios cercanos a la boquilla o bien utilizar el material producto de las excavaciones, en ambos casos será necesario procesar la roca para obtener los tamaños deseados.

Riesgo sísmico. El riesgo sísmico es mínimo, pues el P.H. Zimapan se ubica en la zona de baja sismicidad. Se propone como factor de diseño $g = 0.12$ porque las fallas El Doctor y La Florida son inactivas.

Se concluye que el sitio es muy apropiado para la construcción de la planta hidroeléctrica.

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

- Carrasco, V.B., 1970, La Formación El Abra (Formación El Doctor) en la Plataforma Valles-San Luis Potosí, Rev. Inst. Mexicano del Petróleo, Vol. II, Núm. 3, p. 97-99.
- Carrillo, M. y Suter, M., 1982, Tectónica de los alrededores de Zimapán, Hidalgo y Querétaro: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, IV Reunión Nacional Geotecnia y Geotermia, Libro guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro, p. 1-20.
- C. F. E., 1983, Análisis petrográfico de materiales granulares del Arroyo Mathé y otros. Subdirección de construcción. Depto. de Estudios Experimentales. Oficina de Mecánica de Rocas.
 - , 1983, Estudios geofísicos de factibilidad en el área de la boquilla, P.H. Zimapán, Hgo. Informe Interno Inédito.
 - , 1985, Propuesta de estudio sobre la caracterización de las aguas residuales del Río Tula-Río San Juan, y predicción de sus efectos en los materiales de construcción y maquinaria que se utilizarán en el P.H. Zimapán, Hgo. Depto. de Geohidrología.
 - , 1985, Informe Geológico Final. Etapa de factibilidad. P.H. Zimapán. Informe Interno Inédito.
 - , 1986, Presentación de P.H. en la Dirección General. Avance de los estudios de factibilidad del P.H. Zimapán, Hgo.
 - , 1986, Informe de actividades del período Septiembre-Diciembre. P.H. Zimapán, Hgo. Superintendencia Zona Golfo.
 - , 1986, Informe del Barreno E2-1. Área Boquilla - Alternativa 2. P.H. Zimapán.
- C. F. E. e Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1979, Manual de Diseño de Obras Civiles. Geotecnia. Tomo B.3.2. Obras Subterráneas.
- Cosío A., J.A. y Navarro, C., J.I., 1968, Itinerario y folleto guía de la visita a los P.H. Zimapán y Jiliapan, Estado de Hidalgo. ENEP Acatlán, UNAM - C.F.E.
- Díaz-Molinari, M., 1982, Estudio geofísico en la denominada zona inestable, área del embalse, P.H. Zimapán, Hgo. Informe interno inédito, C.F.E., 3 p.
 - , 1986, Estudio geofísico en la alternativa "G" del eje de cortina para el P.H. Zimapán. Hidalgo. Superintendencia de Estudios Zona Centro. Informe interno inédito, C.F.E.

- Dowrick, D.J., 1977, **Earthquake resistant design (A manual for engineers and architects)**, John Wiley & Sons., p. 1-21 y 40-43.
- Esteve-Maraboto, L., 1970, **Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería**. Publicaciones del Instituto de Ingeniería, UNAM, Núm. 246.
- , 1975, **Geology and predictability in the assessment of seismic risk**, 2nd Int. Congress of the International Assoc. of Engineering Geology, Sao Paulo, Brasil (1974), Publicaciones del Instituto de Ingeniería, UNAM, Vol. E13.
- Barrido-Urbe, J.L., 1987, **Geología de detalle del portal de entrada del túnel de desvío. P.H. Zimapán**, Residencia Zimapán, Hgo. Informe interno inédito, C.F.E.
- Kerr, F.F., 1977, **Optical Mineralogy (Fourth Edition)**, Mac Graw Hill.
- Longoria, J.F., 1984, **Mesozoic Tectostratigraphic domains in East-Central México: Jurassic-Cretaceous Biochronology and Paleogeography of North America**, Geological Association of Canada Special Paper 27, p. 65-76.
- López-Portillo, J., 1980?, **Estado de Hidalgo**, Informática IEPES, PRI.
- Lugo-Hubb, J.I., 1986, **Las estructuras mayores del relieve terrestre**, Facultad de Ingeniería, UNAM, p. 31-32.
- Norán-Zenteno, D.J., 1985, 2^{da} ed., **Geología de la República Mexicana**, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática - Fac. de Ingeniería, UNAM.
- Palacios-Nieto, M., 1982, **Geología y Geotecnia del Proyecto Hidroeléctrico Zimapán**, Estados de Hidalgo y Querétaro: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, IV Reunión Nacional Geotecnia y Geotermia, Libro guía de la excursión geológica a la región de Zimapán y áreas circundantes, Estados de Hidalgo y Querétaro, p. 33-41.
- Pérez-Angón, P.B., 1982, **Informe final de los estudios sísmicos en el área de la boquilla. P.H. Zimapán**, Informe interno inédito, C.F.E.
- Raisz, E., 1964, **Landforms of Mexico**, Mapa con texto, Escala aproximada 1: 3 000 000. Cambridge, Mass., Second corrected edition.
- Segerstrom, K., 1962, **Geology of south-central Hidalgo and northeastern México**, Mexico: U.S. Geol. Survey, Bull. 1104C, p. 87-162.

- Simmons, F.S., y Mapes, V.E., 1956, *Geology and ore deposits of the Zimapán Mining District, State of Hidalgo, México*: I.G.G.S.; Prof. paper 284, 128 p.
- Turner, F.J., Williams, H., y Gilbert, Ch.M., 1983, *Petrografía*, Cuarta edición, Ed. CECOA.
- Uribe Carvajal, A., 1985, *Riesgo sísmico en el P.H. Zimapán*, Informe Interno Inédito, C.F.E.
- Uribe, C., A. y Aguilar, V., F.J. 1985, *P.H. Zimapán, Estudio de potencial tectónico*, Informe Interno Inédito, C.F.E.
- Wilson, B.W., Hernández, M., J.P. y Meave, T.E., 1955, *Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro, México*: Bol. Soc. Geol. Mexicana, V. 18, p. 1-10.

CARTAS:

- Carta de Climas: 14 D - III Querétaro. Escala 1: 500 000
Dirección de Planeación, CETENAL-UNAM. Enero de 1970.
- Carta fisiográfica, S.P.P., 1981.
Hoja México, Esc. 1: 1 000 000.

INDICE DE ANEXOS:

ANEXO I. ESTUDIOS PETROGRAFICOS.

1.- TVR-1	Brecha de falla -----	59
2.- TVR-2	Dolomia -----	60
3.- TVR-3	Brecha dolomitica -----	61
4.- TVR-4	Dolomia -----	62
5.- TVR-5	Brecha dolomitica y dolomia -----	63
6.- TVR-6	Andesita de piroxeno -----	64
7.- TVR-7	Andesita de diópsido y augita -----	65
8.- TVR-8	Andesita de diópsido-hornblenda -----	66
9.- TVR-9	Toba litica -----	67
10.-TVR-9	Toba litica -----	68
11.-TVR-10	Grauwaca litica calcárea -----	69
12.-TVR-11	Toba vitrea hematizada -----	70

Nota: La numeración de las muestras indicada entre paréntesis, en cada hoja, corresponde a la asignada en la Facultad de Ingeniería, UNAM.

ANEXO II. BANCOS DE MATERIALES.

1.- Arroyo El Paraje -----	71
2.- Arroyo Mathé -----	73
3.- Arroyo Carrizo -----	76
4.- El Comalito -----	79

ANEXO III. ESTRUCTURAS GEOLOGICAS REGIONALES.

Según aparecen en el Plano Geológico Regional de C.F.E. --- 80

PLANOS ANEXOS:

- I.- Plano Geológico Regional
- II.- Plano Geológico a detalle de las opciones para ubicar el Vertedor del P.H. Zimapán.
- III.- Plano Geológico a detalle del área de Obra de Toma para el P.H. Zimapán.

FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-1

(FI-88-133)

Localidad: Brecha de la Falla Tula, entre los puntos 18B-18C.
Arroyo, punto 22.

Descripción del afloramiento: Contacto inferior de la Falla Tula con calizas de la Fm. El Doctor, el ancho de la brecha es \approx 8 m, el tamaño de los fragmentos varía de 1mm hasta 1 m y son angulosos, la matriz es color rojiza, arcillosa.

II. DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA.

Estructura y texturas: Cataclástica.

Minerales observables: Calcita, opacos, arcillosos.

Color: Rojizo, manchas grises y negras.

III. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA.

Textura: Granular.

Mineralogía:

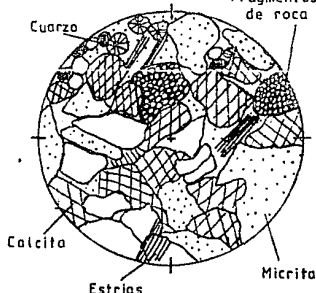
a) Minerales esenciales:
Calcita recristalizada
Micrita

c) Minerales secundarios:
Espatita
Arcillosos

b) Minerales accesorios:
Opacos < 1%
Cuarzo con crecimientos radiales

d) Matriz o cementante:
Micrítica
Fragmentos de roca

c) Caracteres especiales:
Fantasmas de fósiles, vetillas rellenas de calcita recristalizada (espatita), contiene algunos fragmentos de roca volcánica.



IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Metamorfismo dinámico asociado al movimiento de la Falla Tula.

V. CLASIFICACIÓN : Brecha de falla.

FACULTAD DE INGENIERIA-LINAM:
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-2

(FI-88-134)

Localidad: Boquilla. P.H. Zimapán. Margen izquierda, acceso inferior.
Cadenamiento 0 + 41.70, punto V-3.

Descripción del afloramiento: Muestra tomada sobre un horizonte arcilloso.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y texturas: Sacaróide

Minerales observables: Dolomita, calcita, arcilla

Color: Gris, estribos gris claro, contra roja.

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Texturas:

Mineralogías:

a) Minerales esenciales:
Dolomita
Micrita

c) Minerales secundarios:

b) Minerales accesorios:
Opacos < 1%

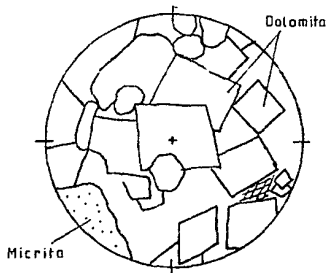
d) Matriz o cementantes:
Espatita y micrita

c) Caracteres especiales:

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Roca triturada y recrystalizada,
al tiempo de la cabalgadura, ocurre
en planos semi-paralelos a la
estratificación.

V. CLASIFICACION :
Dolomía.



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-3

(FI-88-135)

Localidad: Boquilla. P.H. Zimapán. Margén izquierda, acceso superior.
Cadenamiento 0 + 103. Elevación 1 530. Punto V-22.

Descripción del afloramiento: Muestra tomada de un horizonte arcilloso.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Sacaróide, clástica. Estratificación. Clástica.

Minerales observables: Dolomita, calcita.

Color: Crema a gris.

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Granos subhedrales en matriz de espatita y micrita. Clástica.

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Dolomita
Calcita

c) Minerales secundarios:

b) Minerales accesorios:

Opacos < 1%

d) Matriz o cementante:

Espatita y micrita

c) Caracteres especiales:

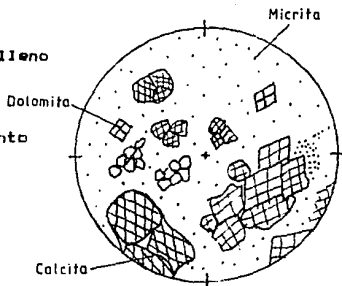
Presenta microfracturamiento relleno
de espatita

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Sedimentaria, afectada por movimiento
al tiempo de la cabalgadura

V. CLASIFICACION :

Brecha dolomítica



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-4

(FI-88-136)

Localidad: Boquilla P.H. Zimapán. Margén izquierda, acceso inferior

Descripción del afloramiento: Muestra tomada de un horizonte arcilloso

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Grainstone

Minerales observables: Dolomita, arcilla

Color: Amarillo a rosado

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Grainstone

Mineralogía: Dolomita.

a) Minerales esenciales:

Dolomita
Espatita

c) Minerales secundarios:

b) Minerales accesorios:

Hematita
Opacos

d) Matriz o cementante:

Micrita

c) Caracteres especiales:

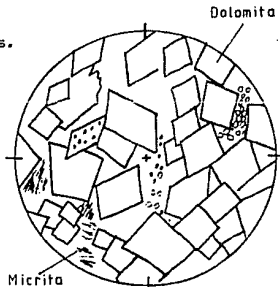
Dolomita euhedral, granos casi iguales.

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Sedimentario afectado por movimiento,
al tiempo de la cabalgadura,
ocasionando recristalización.

V. CLASIFICACION :

Dolomía



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM;
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TRV-5

(FI-88-137)

Localidad: Boquilla. P.H. Zimapán. Socavón 3. Margén izquierda, acceso superior. Cadenamiento 0 + 44

Descripción del afloramiento:

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Bioclástica. Estratificación.

Minerales observables: Calcita, dolomita.

Color: Bandas gris oscuro y gris crema

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Texturas: Clastos en matriz grainstone

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Dolomita

Calcita recristalizada

Micrita

c) Minerales secundarios:

b) Minerales accesorios:

Opacos

d) Matriz o cementante:

c) Caracteres especiales:

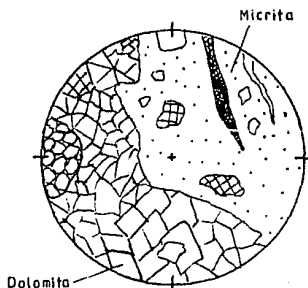
Las bandas oscuras muestran una textura mudstone, en el ejemplar de mano.

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Sedimentario

V. CLASIFICACION :

Brecha dolomítica y dolomía



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-6

(FI-88-138)

Localidad: Embalse P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-34.

Descripción del afloramiento: Cambio de las tobas amarillo-verdosas a rojizas. Siguiendo el contacto sobre el arroyo.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Amigdaloides

Minerales observables: Vidrio, calcita, plagioclasas.

Color: Rojo con puntos blancos y café rojizos.

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Traquítica

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Andesina
Augita diopsídica
Augita

b) Minerales accesorios:

Apatito

c) Caracteres especiales:

c) Minerales secundarios:

Vesículas de calcedonia,
calcita y tridimita.
Hornblenda

d) Matriz o cementante:

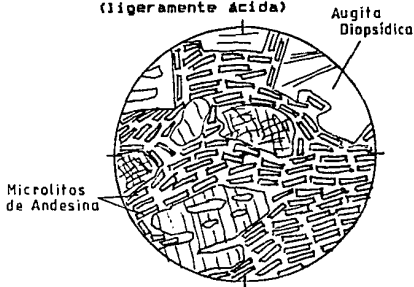
Traquítica y vítreo
(ligeramente ácida)

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Extrusión volcánica

V. CLASIFICACION :

Andesita de piroxeno



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-7

(FI-88-139)

Localidad: Embalse. P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-35.

Descripción del afloramiento: Andesita a toba andesítica intemperizada. Muestra tomada a unos 20-30 m del arroyo. Punto V-34.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Porfídica.

Minerales observables: Plagioclasas.

Color: Gris con cristales mayores de ferromagnesianos alterados.

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Porfídica en matriz traquítica. Fluidal.

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Andesina
Augita
Diópsido

b) Minerales accesorios:

Opacos

c) Caracteres especiales:

Amígdalas rellenas de calcedonia y calcita. El diópsido tiene a veces una aureola de augita.

c) Minerales secundarios:

Hornblenda por alteración
Calcedonia
Calcita

d) Matriz o cementante:

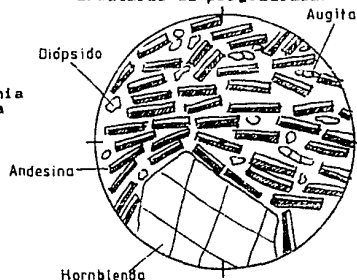
Felsítica (formada por cristales de plagioclasa)

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Extrusión volcánica fluida.

V. CLASIFICACION :

Andesita de diópsido y augita.



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-8

(FI-88-140)

Localidad: Embalse. P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-36.

Descripción del afloramiento: Andesita a toba andesítica, intercalada con laminillas de calcita.

II. DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA.

Estructura y textura: Pseudoestratificación.

Minerales observables: Plagioclasas, ferromagnesianos, calcita

Color: Gris a pardo con puntos café rojizos.

III. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA.

Textura: Porfiritica con matriz microlítica, fluidal. Piroclástica.

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Andesina
Diópsido-augita
Hornblenda

b) Minerales accesorios:

Opacos-óxido de hierro
Hematita

c) Caracteres especiales:

Cuadrados opacos en la lámina delgada
y en la muestra de mano pequeños
cubos de 0.7 x 0.5 mm, aprox.

c) Minerales secundarios:

Sericita
Calcita en vetillas y cavidades
y en finas laminillas
intercaladas.

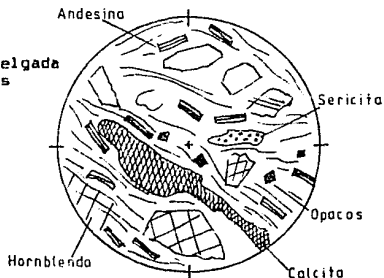
d) Matriz o cementante:

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Vulcanosedimentario.

V. CLASIFICACION :

Andesita de diópsido-hornblenda.



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-9

(FI-88-141)

Localidad: Embalse. P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-3B.

Descripción del afloramiento: Toba litica-arenosa, poco consolidada color verde amarillento, intercalada con otra toba litica rosada de fragmentos mayores a 3 x 4 cm.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Piroclástica.

Minerales observables: Vidrio.

Color:

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Piroclástica.

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:

Andesina
Vidrio

c) Minerales secundarios:

b) Minerales accesorios:

Augita
Diópsido
Hornblenda
Opacos

c) Caracteres especiales:

Ocurren dos tipos litológicos diferentes. Presenta abundantes fragmentos líticos.

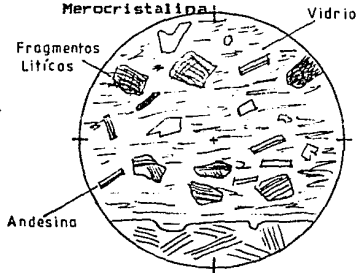
d) Matriz o cementantes
Microcristalina:

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Volcánico.

V. CLASIFICACION :

Toba litica



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-9

(FI-88-141)

Localidad: Embalse P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-38.

Descripción del afloramiento: Misma que el anterior.

II. DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA.

Estructura y textura:

Minerales observables:

Color:

III. DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA.

Textura:

Mineralogía:

a) Minerales esenciales:
Oligoclasa
Microclina
Hornblenda sericitizada

b) Minerales accesorios:
Augita

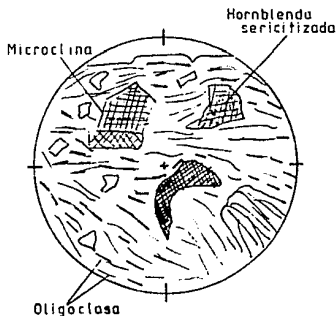
c) Caracteres especiales:
Se observan dos tipos litológicos diferentes en contacto.
Evento más antiguo.

c) Minerales secundarios:
Sericita

d) Matriz o cementante:
Microcristalina

IV. ORIGEN DE LA ROCA :
Volcánico.

V. CLASIFICACIÓN :
Toba litica



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAM
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-10

(FI-88-142)

Localidad: Embalse. P.H. Zimapán. Zona potencialmente inestable. Punto V-39.

Descripción del afloramiento: Roca finamente estratificada (laminar en estratos de 2 cm). Estratificación: NW 81° SE con 23°S.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Laminar

Minerales observables: Calcita, arcillosos, pequeños fragmentos de roca

Color: Blanco amarillento

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Laminar, clástica.

Mineralogía:

- a) **Minerales esenciales:**
Fragmentos de roca (caliza y roca volcánica).
Lodo calcáreo
Opacos
- b) **Minerales accesorios:**
Cuarzo.

c) **Minerales secundarios:**

d) **Matriz o cementantes:**
Matriz calcárea > 15%.

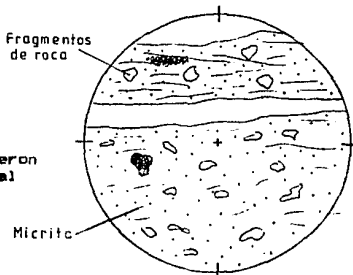
- c) **Caracteres especiales:**
Fragmentos angulosos a sub-angulosos.

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Sedimentario. Esto indica que las rocas de la F. Las Espinas estuvieron cubiertas por un cuerpo de agua, al menos, parcialmente.

V. CLASIFICACION :

Grauvaca lítica calcárea.



FACULTAD DE INGENIERIA-UNAH
Estudio Petrográfico.

I. DATOS DE CAMPO :

Muestra No. TVR-11

(FI-88-143)

Localidad: Embalse. P.H. Zimapan. Zona potencialmente inestable.

Descripción del afloramiento: Contacto de tobas andesíticas con toba vítrea color rojizo, de unos 3 m de espesor.

II. DESCRIPCION MACROSCOPICA.

Estructura y textura: Piroclástica

Minerales observables: Plagioclasas, fragmentos de roca, vidrio.

Color: Rojizo.

III. DESCRIPCION MICROSCOPICA.

Textura: Piroclástica.

Mineralogía:

a) **Minerales esenciales:**

Andesina
Hiperstena
Fragmentos de roca

c) **Minerales secundarios:**

Calcita

b) **Minerales accesorios:**

d) **Matriz o cementante:**

Matriz vítrea.

c) **Caracteres especiales:**

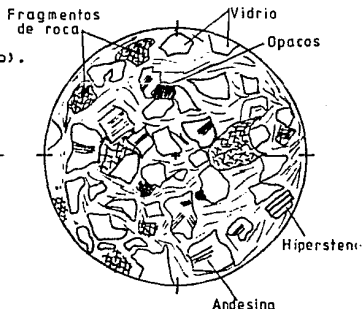
El vidrio está alterado (hematizado).
Las plagioclasas son escasas y
están rodeadas de vidrio.

IV. ORIGEN DE LA ROCA :

Erupción volcánica violenta, posterior alteración.

V. CLASIFICACION :

Toba vítrea hematizada.



ARROYO EL PARAJE.

No. de muestras: 4 : PCA-1, PCA-7, PCA-12 Y PCA-14.

Para efectuar los análisis se consideró como representativa la muestra PCA-1.

Agregado grueso:
Grava de origen fluvialAgregado fino:
De origen fluvial

Componentes:	% en peso	Componentes:	% en peso
Basalto gris medio	33.09	Basalto gris medio	36.10
Basalto vesicular rojo grisáceo	18.46	Basalto vesicular rojo	8.50
Toba litica basáltica roja	7.75	Toba litica basáltica	4.50
Toba pumicitica rosa grisácea	6.25	Toba litica riolítica	3.70
Toba litica riolítica	6.21	Toba de grano fino	20.80
Toba de grano fino riolítica	6.51	Riolítica	
Breccia riolítica	0.55	Riolitas	7.60
Riolita roja grisácea	1.52	Andesita vesicular café	2.20
Riolita gris verdosa	1.32	Andesita porfídica verde	1.30
Quersantita gris verdosa	2.18	Calizas	1.20
Andesita porfídica de piroxeno	3.01	Mármol	0.30
Andesita vesicular verde	1.13	Calcedonia	1.50
Calcedonia	0.12	Calcita	2.70
Caliza gris medio	5.67	Pómez	2.90
Mármol blanco	6.23	Cuarzo	2.50
		Plagioclasas	1.80
		Piroxenas	1.90
		Biotita	tr
		Magnetita	tr
		Materia orgánica	0.50
	100.00		100.00

CALIDAD		AGREGADO GRUESO				AGREGADO FINO
		T A M A Ñ O				
		1 1/2"	3/4"	3/8"	No. 4	
FISICA	Buena	20	26.4	13.9	12.7	19.5
	Regular	80	46.9	69.8	75.1	37.4
	Mala	-	26.7	16.3	12.2	43.1
QUIMICA	Inofensiva	100	36.7	39.9	41.6	44.0
	Delétera	-	63.3	60.1	58.4	56.0

Parámetros granulométricos.

	PCA-1	PCA-7	PCA-12	PCA-14
md (mm)	22.00	10.83	12.70	15.83
S ₀	2.05	2.05	1.43	2.20
S ₄	0.70	0.81	0.77	0.79

Formas:

	%
Tabular (y de hoja) -----	55.2
Equiaxial -----	8.1
Prolada -----	36.7
	<hr/>
	100.0

Conclusión:

Banco integrado por agregados reactivos con los álcalis del cemento. Su calidad física desde el punto de vista petrográfico no es aceptable pues contiene un elevado porcentaje de componentes de calidad regular y mala.

ARROYO MATHE.

No. de muestras: 3 : PCA-1, PCA-19-1 y PCA-19-2.

Son pozos a cielo abierto al inicio y al final del banco.

Agregado Grueso
Grava de origen fluvial.

Componentes:	% en peso			
	PCA-1	PCA-19-1	PCA-19-2	Promedio
Basalto gris medio	40.23	38.22	58.01	45.48
Basalto rojo pálido	13.22	13.13	9.94	12.10
Basalto vesicular rojo	23.17	16.38	15.13	18.23
Caliza gris medio	10.10	10.62	6.27	9.00
Arenisca calcárea	6.67	12.44	4.23	7.78
Toba arenosa vítrea	3.21	1.72	1.51	2.15
Lutita calcárea microf.	1.07	2.62	1.72	1.80
Caliza arcillosa rosa	1.80	3.10	1.64	2.18
Calcita blanca y cuarzo	0.53	1.77	0.97	1.09
Calcedonia	----	----	0.58	1.09
	100.00	100.00	100.00	100.00

Agregado Fino:
Origen fluvial.

Basalto gris medio	46.80	39.01	41.27	42.36
Basalto rojo pálido	5.87	8.72	8.92	7.84
Basalto vesicular rojo	10.49	18.35	18.81	15.89
Caliza gris medio	3.74	4.10	2.73	3.52
Arenisca calcárea gris	7.03	5.32	2.55	4.97
Lutita calcárea microf.	8.43	6.06	5.72	6.74
Toba vítrea	6.83	6.51	9.56	7.63
Caliza arcillosa rosa	2.24	2.36	2.70	2.43
Calcita blanca y cuarzo	4.97	4.81	4.17	4.65
Calcedonia	1.41	0.54	1.29	1.08
Caliche	tr	0.65	0.56	0.40
Cuarzo	1.74	3.20	0.92	1.95
Piroxenas	0.39	0.27	0.80	0.49
Magnetita	0.06	tr	tr	0.02
Materia orgánica	tr	0.10	tr	0.03
	100.00	100.00	100.00	100.00

CALIDAD	AGREGADO BRUESO							AGREG. FINO
	T A M A Ñ O							
	3"	2"	1 1/2"	3/4"	3/8"	No.4		
Muestra No. PCA-1:								
FISICA	Buena	100.0	85.7	85.7	79.5	85.3	84.9	75.5
	Regular	-----	14.3	3.6	17.1	9.6	9.6	9.3
	Mala	---	-----	10.7	3.4	5.1	5.0	15.2
QUIMICA	Inofensiva	100.0	85.7	85.7	87.2	88.9	88.6	79.6
	Delétereas	-----	14.3	14.3	12.8	11.1	11.4	20.4
Muestra No. PCA-19-1:								
FISICA	Buena				81.5	77.2	74.0	74.9
	Regular				18.5	18.8	20.0	9.3
	Mala				-----	4.0	6.0	15.8
QUIMICA	Inofensiva				98.9	84.0	84.3	80.2
	Delétereas				11.1	16.0	15.7	19.8
Muestra No. PCA-19-2:								
FISICA	Buena	100.0	100.0	100.0	92.4	83.2	83.8	78.9
	Regular	-----	-----	-----	3.8	12.0	9.6	5.3
	Mala	-----	-----	-----	3.2	4.8	6.6	15.8
QUIMICA	Inofensiva	100.0	100.0	100.0	94.3	85.6	86.8	82.4
	Delétereas	-----	-----	-----	5.7	14.4	13.2	17.6

Parámetros granulométricos.

	PCA-1	PCA-19-1	PCA-19-2
md (mm)	34.00	6.00	19.00
S ₀	3.02	2.23	2.02
S ₁₁	0.23	0.94	1.37

Formas

	%
Tabular -----	61.5
Hoja -----	15.4
Equiaxial -----	15.4
Proxada -----	7.7
	<hr/>
	100.0

Conclusión:

Banco integrado por agregados reactivos a los álcalis del cemento, calidad física aceptable desde el punto de vista petrográfico.

ARROYO CARRIZO

No. de muestras: 7 : PCA-1, PCA-3, PCA-5, PCA-6, PCA-9, PCA-11 y PCA-13.

Se tomaron como representativas tres de esas muestras que se obtuvieron de pozos a cielo abierto al inicio, a la mitad y al final del banco y son PCA-1, PCA-3 y PCA-13, respectivamente.

Agregado Grueso:

Grava de origen fluvial.

Componentes:

	E n p e s o			
	PCA-1	PCA-3	PCA-13	Promedio
Andesita gris medio	66.34	54.86	19.09	46.76
Basalto gris claro rojizo	9.56	23.89	38.12	23.86
Basalto vesicular rojo oscuro	8.25	6.07	14.46	9.59
Toba vitrea riolítica g. f.	9.24	8.66	10.16	9.35
Andesita vesicular café	2.42	0.54	-----	0.99
Toba litica riolítica c. r.	1.71	1.19	6.59	3.16
Toba vitreo cristalina riol. verde	0.64	1.17	1.66	1.16
Arenisca calcárea café rojiza	0.46	1.55	----	0.67
Caliza arcillosa gris oscura	0.26	0.67	6.16	2.36
Calcita blanca, rosa	0.61	0.71	1.22	0.85
Calcedonia	0.35	0.44	0.83	0.54
Arenisca de grano grueso g.v.	0.10	0.25	----	0.12
Cuarzo	0.06	----	----	0.02
Riolita	----	----	1.71	0.57
	100.00	100.00	100.00	100.00

Agregado Fino:

Andesita gris medio	58.37	10.36	15.22	27.98
Basalto gris oscuro	12.27	48.02	27.93	29.41
Basalto vesicular rojo	-----	13.03	15.71	9.58
Toba vitrea riolítica g.f.	10.52	13.36	20.11	14.66
Toba litica riolítica c.r.	2.17	1.96	2.34	2.16
Toba v-c riolítica verde	1.46	1.51	2.96	1.98
Arenisca litica g.m.	0.54	----	----	0.18
Calizas	----	0.52	2.77	1.10
Lutita calcárea negra	0.57	0.51	----	0.36
Riolita	----	1.49	1.74	1.07
Calcita	3.45	0.89	2.82	2.39
Calcedonia	2.52	1.04	0.91	1.49
Cuarzo	2.92	1.13	2.93	2.33
Piroxenos	1.98	1.04	1.40	1.47
Feldespatos	1.83	4.70	2.25	2.93
Magnetita	1.40	0.44	0.89	0.91
	100.00	100.00	100.00	100.00

CALIDAD	ABREGADO BRUESO				Promedio	ABREGADO FINO
	3/4"	T A M A Ñ O 3/8"		No. 4		
Muestra No. PCA-1:						
FISICA	Buena	74	81	82	79	85
	Regular	11	8	4	8	1
	Mala	15	11	14	13	14
QUIMICA	Inofensiva	14	12	4	10	24
	Delétereas	86	88	96	90	76
Muestra No. PCA-3:						
FISICA	Buena	82	78	80	80	69
	Regular	9	6	3	6	1
	Mala	9	16	17	14	30
QUIMICA	Inofensiva	36	11	8	18	57
	Delétereas	64	89	92	82	43
Muestra No. PCA-13:						
FISICA	Buena	85	63	60	69	57
	Regular	15	18	15	16	2
	Mala	-	19	25	15	41
QUIMICA	Inofensiva	47	31	41	40	38
	Delétereas	53	69	59	60	62

Parámetros granulométricos.

	PCA-1	PCA-3	PCA-5	PCA-6	PCA-13
Md (mm)	7.00	14.00	9.00	11.00	3.60
S ₀	3.16	1.66	1.52	3.53	1.02
S _w	0.82	0.53	0.57	0.89	0.62
C _w	16.67	34.48	17.91	56.67	14.70
C _u	1.31	1.67	1.35	2.83	1.07

Formas:

	%
Tabular y de hoja -----	77.68
Equiaxial -----	18.13
Prolada -----	4.19
	<hr/>
	100.00

Conclusión:

El banco está integrado por agregados reactivos con los álcalis del cemento, su calidad física es aceptable en el agregado grueso pero el agregado fino es de mediana calidad.

EL COMALITO.

No. de muestras: 4: ~~M-1, M-2, M-3, M-4.~~

Se analizó la muestra M-1 por ser representativa.
También se le hizo un análisis petrográfico.

Agregado grueso:
Grava de origen fluvial. 3/4" 3/8" No. 4

Componentes:	% en peso		
Grauvaca calcárea	64.4	48.4	52.8
Lutita	10.4	23.4	17.3
Andesita vesicular	5.9	7.8	7.5
Andesita gris media	3.6	10.9	7.0
Calcita blanca	5.6	4.7	5.8
Toba vítreo crist. riolítica	0.3	1.6	1.3
Andesita vesicular alterada	2.0	1.6	3.5
Caliza arcillosa	7.8	1.6	4.8
Materia orgánica	---	---	tr
	<hr/> 100.0	<hr/> 100.0	<hr/> 100.0

Agregado fino:
La arena pertenece a un depósito fluvial.

Componentes:	% en peso
Grauvaca	25.3
Lutita	39.3
Andesita vesicular	2.7
Andesita	11.2
Calcita	7.8
Toba vítreo crist. riolítica	2.4
Materia orgánica	4.7
Yeso	3.1
Cuarzo	3.0
Mica	0.5
	<hr/> 100.0

CALIDAD		AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO
		T A M A Ñ O			
		3/4"	3/8"	No. 4	
FISICA	Buena	87.3	73.4	77.9	36.1
	Regular	10.4	23.4	---	11.2
	Mala	2.3	3.2	22.1	52.7
QUIMICA	Inofensiva	23.8	29.7	27.9	58.4
	Deletérea	76.2	70.3	72.1	41.6

Conclusiones:

Tanto el agregado fino como el grueso, tienen componentes potencialmente reactivos con los álcalis del cemento. Además, el agregado fino tiene una calidad física mala, también su calidad química se ve afectada por la materia orgánica y el yeso que afectan tanto al fraguado como a la resistencia del concreto.

Nota: Para éste banco no se obtuvo la relación de forma.

ANEXO III.

Correspondencia de los principales rasgos geológicos estructurales con los números que se les asignó en el plano geológico regional.

SEGMENTO NUMERO :	NOMBRE DE LA ESTRUCTURA:	CARACTERISTICAS:	
		Tipo:	Observaciones:
I	El Doctor	Cabalgadura	(de SW a NE)
II	Falla del Rio Moctezuma	Normal	b. p. S
III	Falla Tula	Normal	b. p. S
IV	Falla El Malacate	Normal	b. p. S
V	Falla de Talud	Normal	b. p. SW
VI	Falla del Arenal	Normal	b. p. NE
VII	Falla de Saucillo	Normal	b. p. SW
VIII	Falla Moctezuma II	Normal	b. p. S
IX	Daxhí	Cabalgadura	(de SW a NE)
X	Falla La Florida		
XI			
XII	Falla La Laja	Normal	b. p. SW
XIII	Falla El Cajón		
XIV	2 fallas subsidiarias a XIII		

Nota: La abreviatura b.p. significa bloque de piso y en seguida se indica su posición con mayúsculas.

