



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

***EFFECTO DE LA GEOLOGÍA DE SITIO EN LA RESPUESTA DE PRESAS
ANTE EL SISMO DEL 07 DE SEPTIEMBRE DE 2017***

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA

PRESENTA:

ING. CAROLINA GUERRERO MÁRQUEZ

DIRECTOR DE TESINA: M.I. REGINALDO JOSÉ HERNANDEZ ROMERO

CD.MX.

OCTUBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a la gran casa de estudios, a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y a la Facultad de Ingeniería, por permitirme seguir formando parte de ella y seguir creciendo profesionalmente.

Agradezco a todos los que forman parte del Programa Único de Especializaciones de Ingeniería por hacer posible que cada vez seamos más los estudiantes que formamos parte de él, gracias al buen plan de trabajo que se desarrolla.

De igual manera a las autoridades de la especialidad de geotecnia ya que son de gran apoyo durante este tiempo de aprendizaje.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo institucional para realizar los estudios de especialidad en geotecnia.

A mis profesores de la especialidad de geotecnia que tienen gran experiencia en la materia y logran que las asignaturas sean terminadas satisfactoriamente.

Mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis el M.I. Reginaldo Hernández por su apoyo, dirección y revisión de este trabajo.

A mi tutor el Ing. Bardoniano Soria, por sus consejos y apoyo durante el tiempo de la especialidad, así como sus comentarios y observaciones respecto a este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Rigoberto Rivera, M.I. Valentín Castellanos y al M.I. Oliver Nava, por su tiempo y por su valioso apoyo en la revisión técnica de este trabajo.

También agradezco el apoyo por parte de mis colegas y amigos que me brindaron su apoyo y por los momentos que vivimos durante este corto período.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico especialmente y de todo corazón a mi familia por su gran apoyo y confianza que me brindaron durante mis estudios, ya que ellos han sido el motor fundamental para seguir superándome profesionalmente.

Mis padres Otilia y Rodrigo, por sus palabras de aliento, consejos y gran apoyo, por su gran ejemplo de vida, siempre luchando por cumplir sus metas y nunca rendirse.

A mi hermana Gris, por sus consejos, orientación y motivación para seguir preparándome profesionalmente y por su apoyo incondicional que me motiva para cumplir mis metas.

También dedico este trabajo a una personita muy especial en mi vida, a mi novio Daniel Rosas, que siempre ha estado apoyándome incondicionalmente en cualquier proyecto.

Finalmente, a mis amigos de generación de la especialidad, Ilce, Dani, Rubén, Mario, Ricardo, etc., por mencionar algunos, ya que fueron de gran apoyo y motivación, gracias por compartir sus conocimientos.

Tabla de Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. GENERALIDADES	4
1.1. Localización del sitio	4
1.2. Antecedentes	8
1.3. Geología regional	8
Capítulo 2. SISMICIDAD DE LA REGIÓN	12
2.1. Definición de sismo	12
2.2. Tipos de onda	12
2.3. Origen de los sismos	14
2.4. Regionalización sísmica	14
Capítulo 3. PRESAS SOBRE EL RÍO GRIJALVA	18
3.1. Presa Malpaso	18
3.1.1. Ubicación.	18
3.1.2. Características de la presa	19
3.1.3 Geología local	22
3.2. Presa La Angostura	24
3.2.1. Ubicación.	24
3.2.2. Características de la presa	25
3.2.3 Geología local	28
3.3. Presa Chicoasén	30
3.3.1. Ubicación.	30
3.3.2. Características de la presa	31
3.3.3. Geología local	35
3.4. Presa Peñitas	40
3.4.1. Ubicación.	40
3.4.2. Características de la presa	41
3.4.3. Geología local	44
Capítulo 4. RESPUESTA DE LAS PRESAS ANTE EL SÍSMO	49
4.1. Espectros de respuesta	49
4.2. Funciones de transferencia	51
4.3. Comportamiento dinámico de las presas	52
4.4. Resultados	72
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	82

INTRODUCCIÓN

Entre las obras más importantes de la ingeniería civil se encuentran las presas (pequeñas, medianas o grandes). Estas han sido construidas para almacenar agua, aunque pueden tener diferentes propósitos, como, por ejemplo, suministrar de agua a la población, utilizarla para el riego de tierras de cultivo, controlar avenidas, regular el flujo de ríos, generar energía eléctrica, navegación, recreación, etc.

Las presas al mismo tiempo que benefician a la población también representan un riesgo potencial debido a las fallas que pueden causar pérdidas de vidas humanas y propiedades o deterioro del medio ambiente.

Es por ello que es de suma importancia la seguridad de estas estructuras, y esto se logra realizando un diseño con los más estrictos criterios de seguridad.

Para el diseño de una presa sin duda alguna es la geotecnia la más relevante y trascendental, con sus componentes relacionadas a la mecánica de suelos, mecánica de rocas, túneles y vías terrestres, sin embargo, se involucran diferentes disciplinas de la ingeniería. Por ejemplo, la geología y la topografía guardan lugar significativo en la selección del sitio de la boquilla y el tipo de presa que conviene construir: concreto, tierra, materiales graduados, etcétera.

Cabe mencionar que para la construcción de una presa se deben considerar diferentes etapas de construcción. Por ejemplo, para definir el diseño de una presa consiste en hacer visitas de reconocimiento a los sitios potenciales en los que se pretende construir la boquilla de la presa. En esta etapa se deben realizar las exploraciones geológicas superficiales y profundas para conocer las características de los suelos y las formaciones rocosas. También debe hacerse un estudio en el cual abarque los diferentes fenómenos naturales que se tengan en la región, ya que estos al no tomarse en cuenta pueden ocasionar daños materiales y pérdidas humanas.

Nuestro país se ubica en una zona de alta sismicidad es por eso que el diseño y construcción de estas grandes obras hidráulicas es de gran importancia. Se reconoce que una tercera parte de las presas construidas en el mundo se encuentran en zonas sísmicas. Las presas que se localizan fuera de estas zonas sísmicas aún pueden verse afectadas por la sismicidad inducida por el llenado del embalse.

En México de las presas construidas una gran parte se encuentra en regiones de alta o mediana sismicidad. Es por ello que, la ingeniería sísmica en México aplicada al diseño de presas ha tenido logros significativos en los últimos años.

Es importante realizar el análisis de la respuesta sísmica de las presas a través de los registros de las diferentes estaciones colocadas en las presas.

Con las funciones de transferencia se puede conocer el periodo natural de vibrar de la estructura de interés como las presas y así poder evaluar los efectos del sitio (amplificación o atenuación), y así obtener como varía el movimiento sísmico de un lugar a otro.

Los efectos del sitio difieren de un lugar a otro debido a las características del subsuelo, es por eso que la exploración geológica es muy importante en cada proyecto.

En este trabajo se presentarán las características geológicas de cada zona de cada presa, para poder apreciar cómo influyen en la forma de vibrar. Con los datos obtenidos de cada estación sísmica de las presas se realizarán los espectros de Fourier de una misma señal con ayuda del programa DEGTRA, también se obtendrán los espectros de respuesta de cada presa respecto a la aceleración presentada en el sismo del 17 de septiembre de 2017, para poder validar que la geología o los materiales de las presas intervienen en las respuestas de las vibraciones.

OBJETIVO

Determinar el efecto de la geología regional y local en la respuesta dinámica de cuatro presas, construidas sobre el Río Grijalva, ante el sismo del 07 de septiembre de 2017, mediante la interpretación de los acelerogramas registrados en cada de ellas.

ALCANCES

Se estudiará la geología regional y local del sitio donde están construidas cada una de las presas consideradas, así como sus características geométricas y las características del sismo del 7 de septiembre del 2017, para interpretar la respuesta dinámica de cada una de ellas.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN DEL SITIO

La zona de interés para este trabajo se encuentra ubicada en el estado de Chiapas.

El estado de Chiapas se localiza al sureste de México (Fig. 1.1), colinda al norte con el estado de Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el Océano Pacífico y al este con la República de Guatemala.

Las coordenadas geográficas del estado son: 17°59' al norte, 14°32' al sur de latitud norte; 90°22' al este, 94°14' al oeste de longitud oeste.



Fig.1.1. Localización del estado de Chiapas, (Tomada de Chiapas.gob.mx)

El estado de Chiapas forma parte de las 731 cuencas hidrológicas, las cuales se organizan en 37 regiones hidrológicas (RH) (Fig. 1.2) y a su vez están agrupadas en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA), la Tabla 1.1 muestra las 37 regiones en que está dividido el país hidrológicamente.

Las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas de México y se emplean para el cálculo del agua renovable, (CONAGUA, 2015).



Fig. 1.2. Regiones hidrológicas, (Fuente CNA).

Tabla 1.1. Regiones hidrológicas-Administrativas (INEGI).

Regiones hidrológicas de México				
Administrativas	Regiones hidrológicas	Administrativas	Regiones hidrológicas	
I. Península de baja california	1. Baja california noroeste (Ensenada)	VII. Cuencas Centrales del Norte	35. Mapimi	
	2. Baja california centro oeste (El vizcaíno)		36. Nazas-Aguanaval	
	3. Baja california suroeste (Magdalena)		37. El Salado	
	II. Noroeste	4. Baja california noroeste (Laguna salada)	VIII. Lerma Santiago Pacifico	12. Lerma-Santiago
		5. Baja california centro este (Santa Rosalía)		13. Huicicila
		6. Baja california sureste (La paz)		14. Ameca
		7. Río colorado		15. Costa de Jalisco
8. Sonora norte		IX. Golfo Norte		16. Armeria-Coahuayana
				25. San Frenado Soto La Marina
III. Pacifico Norte		10. Sinaloa		X. Golfo Centro
	11. Presidio-San Pedro	27. Tuxpan-Nautla		
IV. Balsas	17. Costa de Michoacán	XI. Frontera Sur	28. Papaloapan	
	18. Balsas		29. Coatzacoalcos	
V. Pacifico Sur	19. Costa Grande	XII. Península de Yucatán	22. Costa de Chiapas	
	20. Costa Chica-Río Verde		30. Grijalva-Usumacinta	
	21. Costa de Oaxaca		31. Yucatán Oeste (Campeche)	
	22. Tehuantepec		32. Yucatán Norte (Yucatán)	
VI. Río Bravo	24. Bravo Conchos	XIII. Aguas del Valle de México	33. Yucatán Este (Quintana Roo)	
	24. Bajo Bravo		Parte de la 18 (Balsas)	
	24. Bravo (Amistad-Falcón)			
Endorreicas	34. Cuencas Cerradas del Norte (Casas Grandes)			

La región hidrológica número 30 (RH30), Grijalva-Usumacinta es de interés para este trabajo, ya que las cuatro presas de estudio están situadas sobre esta cuenca transfronteriza. Esta ubica al sur de México, nace en Guatemala y cruza los estados de Chiapas y Tabasco. La Región Hidrológica No. 30 posee una extensión continental de 102,641 km², es la más húmeda del país y aloja a los ríos más caudalosos; el río Usumacinta y el río Grijalva, ambos desembocan en el Golfo de México.

La cuenca del río Grijalva comprende de cuatro zonas geográficas bien definidas, que se conocen con los nombres de Alto Grijalva, Medio Grijalva, Bajo Grijalva (Sierra) y Bajo Grijalva (Planicie) (Fig. 1.3).

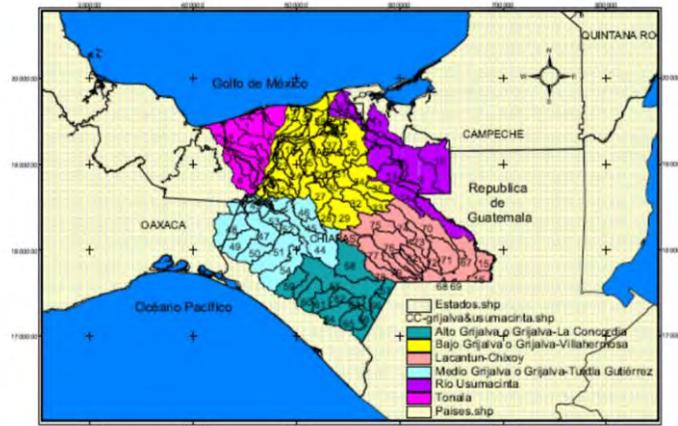


Fig. 1.3. Región hidrológica 30, zonas geográficas del río Grijalva, (CONAGUA, 2003).

Las presas La Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas (Fig. 1.4.) forman parte de las Zonas Alto Grijalva y Medio Grijalva.

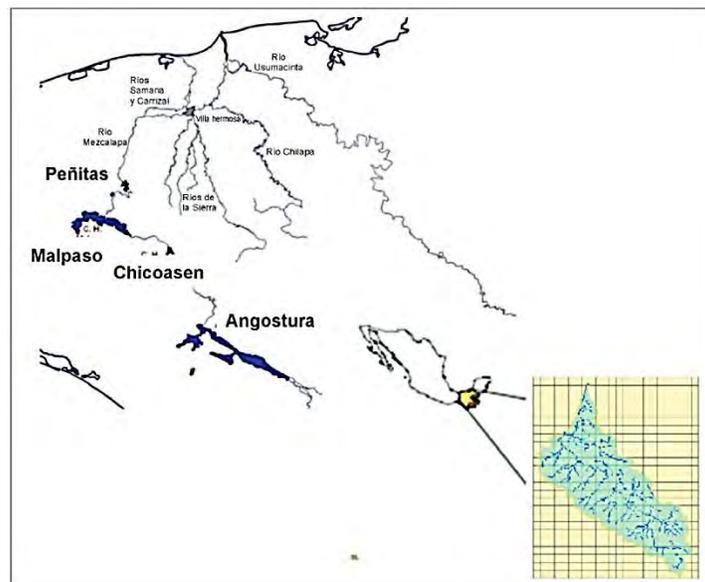


Fig. 1.4. Presas sobre el río Grijalva, (IMTA, CP,2008 <https://www.imta.gob.mx/>).

El Alto y Medio Grijalva (Fig. 1.5), está ubicada en la Depresión Central de Chiapas, cuenta con una extensa zona semiplana bordeada por la Sierra Madre, los Altos y las Montañas del Norte de Chiapas. En esta porción se presentan las mayores elevaciones de Chiapas como las serranías localizadas entre San Cristóbal de las Casas y Comitán, que alcanzan alturas superiores a los 2700 msnm, también está el cañón del sumidero. La máxima elevación se ubica hacia el sureste cerca de la frontera con la República de Guatemala, es el Volcán Tacaná con aproximadamente 4000 msnm.

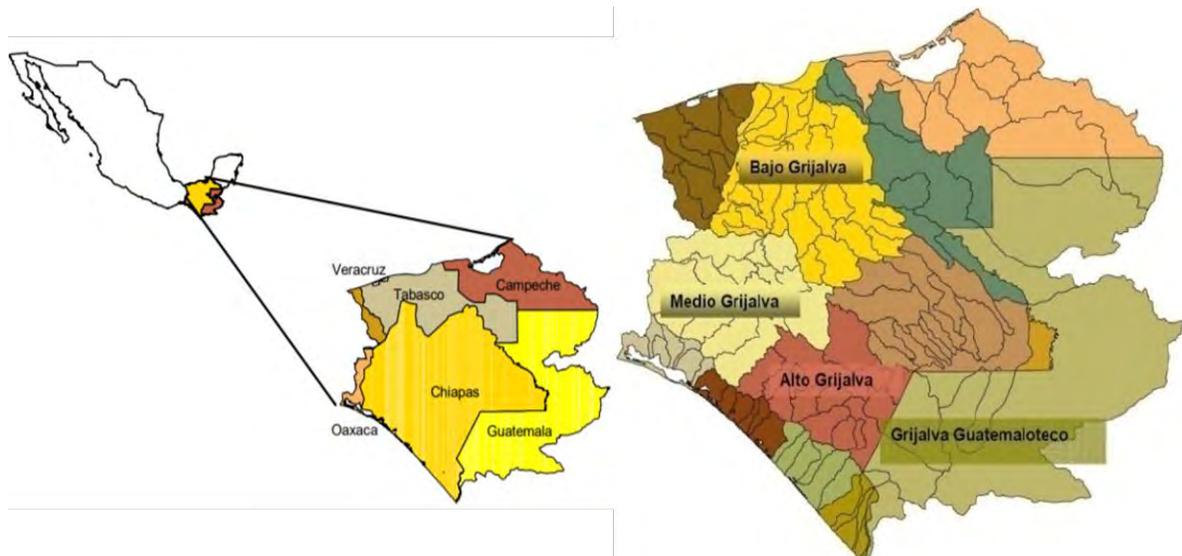


Fig. 1.5. Zonas de la cuenca del río Grijalva, (Global Water Partnership, 2006).

En el Bajo Grijalva (Sierra), ubicado en la Sierra del Norte de Chiapas, se compone de una serie de serranías separadas por alargados valles que bordean a los Altos y las Montañas del Oriente. La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año.

El Bajo Grijalva (Planicie), se presentan planicies ubicadas en la Llanura Costera del Golfo, esta llanura es ocupada en su mayoría por el estado de Tabasco, está formada por grandes cantidades de aluvión acarreado por los ríos más caudalosos del país: Usumacinta, Grijalva, Papaloapan y Coatzacoalcos; los cuales atraviesan dicha porción para finalmente desembocar en la parte sur del Golfo de México.

En la parte alta de la cuenca se ubica una de las zonas de mayor precipitación en México, con poco más de 4,000 mm anuales. En esta zona se registran las más altas precipitaciones cuando hay combinación con la entrada de frentes o corrientes de aire frío y ocasiona severas inundaciones aguas abajo.

En la planicie del Bajo Grijalva la precipitación oscila entre los 1,700 mm y 2,300 mm, la influencia de sistemas atmosféricos es similar que, en la parte alta del Bajo Grijalva, pero la

precipitación disminuye porque no existen todas las combinaciones antes mencionadas. (Global Water Partnership, 2006).

1.2 ANTECEDENTES

Para controlar las crecientes del río Grijalva y generar energía eléctrica se construyeron cuatro presas hidroeléctricas, que forman parte del Plan Integral de Desarrollo del río Grijalva, iniciativa impulsada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Comisión del río Grijalva a mediados del siglo XX.

La primera, que abarcó la construcción de la Presa Malpaso o también conocida con el nombre Netzahualcóyotl, ubicada en el sitio denominado Raudales de Malpaso, Chiapas, en el municipio de Tecpatán. La Comisión Federal de Electricidad, tuvo a su cargo el diseño y construcción de la planta hidroeléctrica. Se terminó de construir en el año de 1964, tiene una capacidad de almacenamiento de 10,596 millones de metros cúbicos de agua, una cortina de 138 metros de altura y tiene 478 metros de longitud en la corona, tiene una capacidad efectiva de 1,080 megavatios.

La segunda, contemplo el proyecto hidroeléctrico La Angostura llamada oficialmente Belisario Domínguez, obra que arrancó en 1969 y terminó en 1974, se ubica en el municipio Venustiano Carranza, Chiapas. Tiene una capacidad de almacenamiento de 12,764 millones de metros cúbicos, la cortina mide 143 metros de altura y una capacidad efectiva de 900 megavatios.

La tercera, proyecto que originalmente se llamó “Cañón del Sumidero”, llamada presa Chicoasén u oficialmente Manuel Moreno Torres, está ubicada en el municipio Chicoasén, Chiapas. Terminó de construirse en el año 1980, tiene una capacidad de almacenamiento de 1,632 millones de metros cúbicos, una cortina de 261 metros de altura y una capacidad efectiva de 2,400 megavatios.

La cuarta, oficialmente nombrada Ángel Albino Corzo o mejor conocida como Peñitas, está ubicada en el municipio de Ostucán, Chiapas. Se terminó de construir en el año 1986. Tiene una capacidad de almacenamiento de 1,500 millones de metros cúbicos, una cortina de 43 metros de altura y una capacidad efectiva de 426 megavatios.

1.3 GEOLOGÍA REGIONAL

Esta entidad federativa presenta un marco geológico complejo, mismo que ha evolucionado. Se encuentran expuestas rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas que cubren un rango de edad desde el Paleozoico hasta el reciente. Ortega et al, 1991, divide al estado de Chiapas en seis provincias geológicas.

- Cuenca Deltaica de Tabasco: ocupa principalmente el extremo noroccidental del estado.
- Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas: constituye la provincia geológica más extendida en la entidad, ocupando prácticamente un 70% de la superficie estatal, está conformada principalmente por extensos afloramientos de rocas sedimentarias calcáreas y arcillo-calcáreas pertenecientes al Grupo Sierra Madre de edad Mesozoica.
- Batolito de Chiapas: comprende una franja de rocas plutónicas alineada en dirección NW-SE, sensiblemente paralela a la costa del Océano Pacífico, compuesta por rocas cristalinas metamorfoseadas de edad Paleozoica.
- Macizo Ígneo del Soconusco: esta provincia se localiza en el extremo suroriental de la entidad y representa parte del Arco Magmático Chiapaneco, la cual incluye el entorno geológico del volcán Tacaná y las rocas volcánicas asociadas.
- Cuenca de Tehuantepec: en ella se incluyen depósitos sedimentarios recientes localizados en la zona costera de la entidad.
- La Provincia Cuicateca: en su mayoría se encuentra expuesta en el estado de Oaxaca, está constituida por un cinturón de rocas de afinidad vulcano-sedimentaria epimetamórfica localizada en la parte occidental del estado.

Por su parte, la columna estratigráfica generalizada para el estado de Chiapas se describe a continuación (Castro-Mora, 1999) (Fig. 1.6).

Terreno Chortis, este terreno marca el límite de las Placas Caribe y de Norte América; su basamento está conformado por rocas metamórficas y plutónicas que oscilan en edad del Precámbrico al Paleozoico, conocido como Grupo Las Ovejas (Schuartz, 1979). La cobertura de este terreno está representada por una secuencia mesozoica sedimentaria con paquetes de rocas plutónicas y volcánicas de edad Cretácica, sobre las cuales descansan los sedimentos y horizontes de rocas volcánicas del Cenozoico.

Terreno Maya, la parte que corresponde al estado de Chiapas tiene como basamento a rocas metamórficas de edad Paleozoica que pertenecen al Grupo Chuacús, sobre el cual descansa toda la columna de rocas mesozoicas y rocas suprayacentes de edad cenozoica; las fallas que delimitan a este terreno en su extremo meridional corresponden al sistema de fallas laterales Polochic-Mapastepec.

El Macizo de Chiapas es la unidad que constituye el basamento del estado y está compuesto por granitos, dioritas y gneis cuarzo-feldespáticos de edad pérmica (Castro-Mora et al., 1999). Sobre estas rocas se encuentran otras del Paleozoico superior representadas por una serie detrítica perteneciente a las formaciones Paso Hondo, Vainilla y Grupera, así como por rocas metamórficas que incluyen serpentinitas, esquistos, gneises y cuarcitas. Tales rocas se encuentran afectadas por intrusiones ígneas que varían de rocas básicas (gabros) a rocas ácidas (granitos). Todas ellas pertenecen al Batolito de Chiapas, cuyas edades isotópicas son únicamente en el Pérmico (isócronas de Rb-Sr; Damon en Salas, 1975). Estas rocas

constituyen lo que geográficamente se denomina como macizo granítico de Chiapas y afloran principalmente en el sector meridional de la entidad.

Cubriendo de manera discordante a las rocas del basamento, se tiene el conjunto de rocas mesozoicas marinas que van del Triásico-Jurásico al Cretácico Superior. Esta secuencia de rocas ha sido agrupada en las formaciones Todos Santos, Mogoñé, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocoautla y Méndez, las cuales afloran principalmente en la porción centro septentrional de la entidad. Constituyen zonas montañosas muy abruptas de anticlinorios y sinclinorios cuyos ejes axiales están orientados en dirección NW-SE siguiendo el patrón de deformación de la provincia geológica de Pliegues y Fallas, fisiográficamente conocida como Sierra Madre Oriental, (Castro-Mora et al., 1999).

Sobre la secuencia de rocas mesozoicas descansa concordantemente un paquete de rocas cenozoicas cuyo rango de depósito abarca del Paleoceno (Formación Soyaló) al Plioceno (Formación Tres Puentes). Las rocas de la Formación Soyaló son de origen marino y constituyen depósitos rítmicos tipo flysh. Por su parte las rocas eocénicas son de naturaleza mixta (continental y marina), las cuales presentan capas rojas hacia el límite con el Oligoceno marino, cuyas rocas están representadas por calizas (Formación Macuspana) y rocas detríticas (Formación La Laja), (Castro-Mora et al., 1999.).

Por su parte, las rocas del Mioceno son de origen marino y están conformadas por una serie arcillo-calcárea representadas, de base a la cima, por las formaciones Encanto, Amate inferior y superior, Tulijá y Belem, las cuales se encuentran mejor expuestas hacia la porción septentrional de la entidad. Finalmente, durante el Plioceno-Holoceno se conformaron depósitos de limos, arenas, arcillas, así como depósitos piroclásticos derivados de las actividades volcánicas del Chichonal y del Tacaná, así como por materiales aluviales y suelos residuales (Castro-Mora et al., 1999).

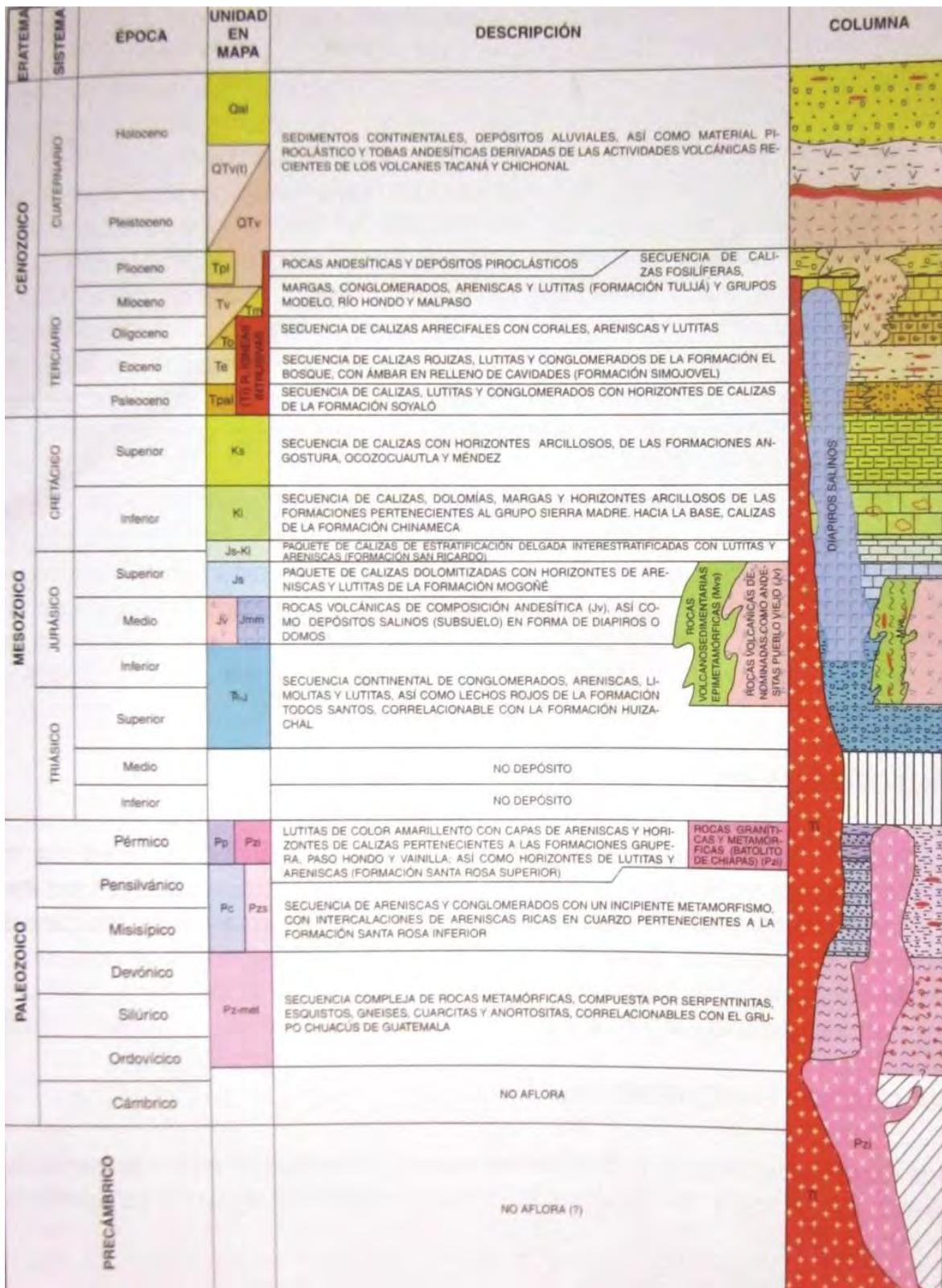


Fig. 1.6. Columna estratigráfica generalizada del estado de Chiapas. (Monografía Geológico-Minera del estado de Chiapas, Castro-Mora, 1999).

CAPÍTULO 2. SISMICIDAD DE LA REGIÓN

2.3 DEFINICIÓN DE UN SISMO

Cotidianamente por sismo, temblor o terremoto entendemos un movimiento fuerte del suelo, sacudidas o movimientos bruscos del terreno, lo cual hace que todo lo que está a nuestro alrededor se mueva.

Sin embargo, los sismos son vibraciones o perturbaciones súbitas producidas en el interior de la tierra, causadas principalmente por la ruptura y fracturamiento de las rocas de las capas más exteriores de la tierra, esto a consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra o a la tectónica de placas.

Esta energía es transmitida a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El foco o hipocentro el punto donde inician los sismos, puede situarse a un máximo de unos 700 km hacia el interior terrestre, y es llamado epicentro al punto de la superficie terrestre más próximo al foco del terremoto.

La mayoría de las veces estos movimientos son ligeros y sólo ocasionalmente llegan a ser tan intensos como para hacer caer objetos, romper vidrios. No obstante, puede llegar el caso de que el sismo sea de tal magnitud que las paredes de algunas casas y edificios se agrieten o se desplomen.

La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicas más activas del mundo, ubicada dentro del Cinturón Circumpacífico en donde se centraliza la mayor actividad sísmica del planeta.

La gran sismicidad que se presenta en el país es debido a la interacción entre las placas tectónicas, la placa Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe.

Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, Colima y Jalisco son los estados con mayor sismicidad en la República Mexicana debido a la interacción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera que subducen con las de Norteamérica y del Caribe sobre la costa del Pacífico.

2.2 TIPOS DE ONDA

Cuando ocurre un sismo, se originan diferentes tipos de ondas sísmicas: ondas de cuerpo y ondas superficiales.

Las ondas de cuerpo son aquellas que viajan a través del interior de la tierra y son de dos tipos, (Fig. 2.1 a y b):

- Ondas P, también conocidas como ondas primarias, comprensivas o longitudinales, implican compresión sucesiva y rarefacción de los materiales a través de los cuales pasan. El movimiento de una partícula individual a través de la cual viaja una onda P es paralela a la dirección de desplazamiento. Al igual que las ondas de sonido, las ondas P pueden viajar a través de sólidos y fluidos.
- Ondas S, también conocidas como ondas secundarias, de corte o transversales, causan deformaciones de corte a medida que viajan a través de un material. El movimiento de una partícula individual es perpendicular a la dirección de la trayectoria de la onda. La dirección de movimiento de la partícula se puede utilizar para dividir las ondas S en dos componentes, SV (movimiento en el plano vertical) y SH (movimiento en el plano horizontal).

La velocidad a la que viajan las ondas de cuerpo varía con la rigidez de los materiales que atraviesan. Como los materiales geológicos son más rígidos en compresión, las ondas P viajan más rápido que otras ondas sísmicas y, por lo tanto, son las primeras en llegar a un sitio en particular.

Los fluidos, que no tienen rigidez de corte, no pueden sostener ondas S.

Las ondas superficiales más importantes, para fines de ingeniería, son las ondas Rayleigh y las ondas Love, (Fig. 2.1 c y d):

- Ondas Rayleigh, producidas por la interacción de las ondas P y SH con la superficie de la tierra, implican un movimiento de partículas tanto vertical como horizontal. Son similares, en algunos aspectos, a las olas producidas por una roca arrojada a un estanque.
- Ondas Love, resultan de la interacción de las ondas SH con una capa superficial suave y no tienen componentes verticales de movimiento de partículas.

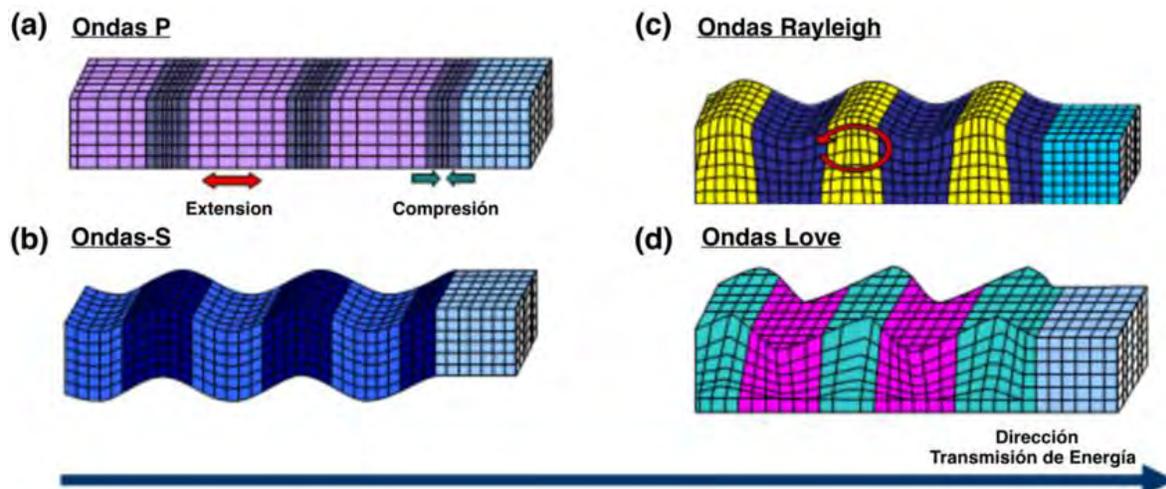


Fig. 2.1. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas. Ondas de cuerpo a y b, ondas superficiales c y d. (Tomada de Saez, M., 2016).

2.3 ORIGEN DE LOS SISMOS

La causa principal que da origen a los sismos es la repentina liberación de energía de la ruptura de las rocas en los límites de las placas tectónicas. Sin embargo, existen otras fuentes de actividad sísmica que dan origen a pequeños sismos. En la actualidad se reconocen tres clases generales de terremotos:

- **Actividad volcánica:** las erupciones volcánicas pueden liberar enormes cantidades de energía esencialmente en la superficie de la tierra y pueden producir un movimiento significativo del suelo.
- **Explosivos:** las detonaciones de explosivos químicos o dispositivos nucleares dan origen a las ondas sísmicas provocando deslizamientos de tierra, colapso de techos de minas o cavernas, entre otros.
- **Sismos inducidos por reservorios:** al llenar el embalse de una presa los sismos locales poco profundos pueden volverse comunes en un área que anteriormente se consideraba prácticamente asísmica. Si bien es probable que el efecto del peso del agua confiscada sea insignificante en las profundidades de la actividad sísmica inducida, un aumento en la presión del agua de poro que migra como un "pulso" lejos del depósito después del llenado puede haber sido suficiente para reducir la resistencia de la roca hasta el punto donde podría ocurrir la ruptura.

2.4 REGIONALIZACIÓN SÍSMICA

Para fines prácticos, nuestro país está dividido en cuatro zonas sísmicas (Fig. 2.2) ajustado a partir del manual de diseño de obras civiles de la CFE (Comisión Federal de Electricidad).

Estas cuatro zonas están denominadas como A, B, C y D, representan zonas de menor a mayor riesgo sísmico y se han definido básicamente en función de la sismicidad propia de cada región, (Tabla. 2.1), (INIFED, 2014).

La zona con mayor actividad sísmica está situada en los estados de la costa del Pacífico, debido a la gran actividad de las placas tectónicas. Con ayuda de las redes de detección instaladas en gran parte del país, se sabe que los estados que presentan mayor actividad sísmica son Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, así como en la parte norte de la península de Baja California, en la región de Mexicali, (CENAPRED, 2015).



Fig. 2.2. Regionalización sísmica de la República Mexicana, (INIFED, 2014).

La **zona A** es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no hay reportes de sismos en los últimos 80 años y es de esperarse aceleraciones del suelo menores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.

Las **zonas B y C** son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

La **zona D** es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Tabla 2.1. Zonas sísmicas por Entidad en la República Mexicana, (INIFED, 2014).

ENTIDAD FEDERATIVA	ZONAS SÍSMICAS	ENTIDAD FEDERATIVA	ZONAS SÍSMICAS
AGUASCALIENTES	A y B	NAYARIT	B y C
BAJA CALIFORNIA	C y D	NUEVO LEÓN	A
BAJA CALIFORNIA SUR	B y C	OAXACA	C y D
CAMPECHE	A y B	PUEBLA	B y C
COAHUILA	A y B	QUERÉTARO	B
COLIMA	D	QUINTANA ROO	A
CHIAPAS	B, C y D	SAN LUIS POTOSÍ	A y B
CHIHUAHUA	A y B	SINALOA	B y C
CIUDAD DE MÉXICO	B	SONORA	B y C
DURANGO	A y B	TABASCO	B
GUANAJUATO	B	TAMAULIPAS	A
GUERRERO	C y D	TLAXCALA	B
HIDALGO	B	VERACRUZ	B y C
JALISCO	B, C y D	YUCATÁN	A
MICHOACÁN	B, C y D	ZACATECAS	A y B
MORELOS	B y C		

Existe otra subdivisión del país que está dada por Regiones Sísmicas, Penisísmicas y Asísmicas.

Las **zonas sísmicas** están localizadas al sur y suroeste de la República, abarca los estados de México, Colima, Michoacán, Guerrero, Morelos, Oaxaca, sur de Veracruz, Chiapas, Jalisco, Puebla y Ciudad de México; las **zonas penisísmicas** abarcan la Sierra Madre Occidental, las llanuras de Sonora, Sinaloa, Nayarit, así como la región transversal que va del sur de Durango al centro de Veracruz y, las **zonas asísmicas** se sitúan en la parte norte y noreste de México, en casi toda la península de Baja California y en la península de Yucatán.

En México se tienen áreas de mayor riesgo: concentrándose en la costa occidental del país a lo largo de los bordes de varias placas cuyo contacto es conocido como Trinchera. De acuerdo con el SAS, la “brecha sísmica” representa las zonas donde no han producido sismos de 7 o más grados en la escala Richter por un largo periodo de tiempo (50 años o más) para determinar la Brecha de Guerrero (cerca de 100 años de acumulación de energía elástica), la Brecha de Jalisco (aproximadamente 70 años) y la Brecha de Chiapas (con más de 300 años) como las áreas de riesgo en el país, (SGM, 2017).

Para medir los sismos se emplean dos aparatos, los sismógrafos y acelerógrafos. La magnitud de un sismo es la cantidad de energía liberada y es medido con la escala de Richter, la intensidad mide la destrucción del lugar ligada a los efectos del sitio a partir de la escala de Mercalli.

3.4 PRESA MALPASO, NETZAHUALCÓYOTL



Fig. 3.1. Presa Malpasso, Chiapas (Tomada de Gildardo Cancino, <https://www.elheraldodechiapas.com.mx>).

3.1.1 Ubicación

La presa Malpasso, formalmente llamada Presa Netzahualcáyotl (Fig. 3.1.), está situada en el cauce del río Grijalva en un estrechamiento denominado Raudales de Malpasso, ubicada entre los municipios de Berriozábal, Tecpatán y Ocozocoautla de Espinosa en el noroeste del estado de Chiapas. Se localiza a 2.5 km aguas debajo de la confluencia de los ríos la Venta y Grijalva, aproximadamente al suroeste de la ciudad de Villahermosa, Tabasco y a 138 km aguas arriba de la desembocadura en el Golfo de México (Fig. 3.2) con coordenadas 17°10'43" N, 93°35'54" W.

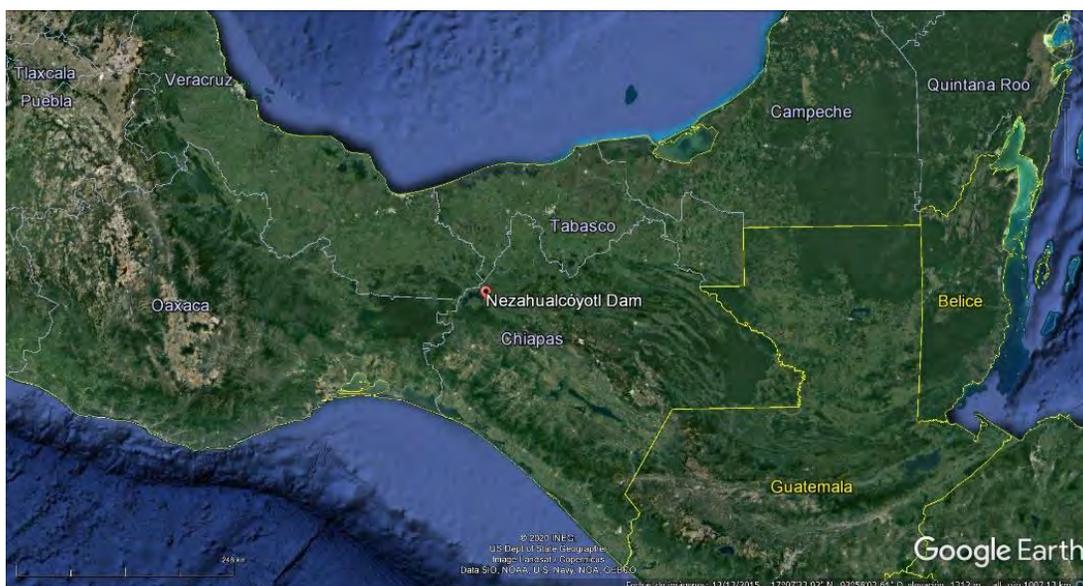


Fig. 3.2. Ubicación de la Presa Malpaso, Chiapas.

3.1.2 Características de la Presa

La presa Malpaso, tuvo por objetivo controlar las avenidas máximas registradas en el río Grijalva, para reducir los gastos y que no se ocasionaran inundaciones catastróficas en los poblados de La Chontalpa, producir de 2,754 millones de kilowatts-hora anuales de energía eléctrica, tener un riego de 350,000 hectáreas en La Chontalpa y permitir la navegación de pequeñas embarcaciones.

El área de la cuenca (Fig. 3.3.) es de 33,740 km² y el escurrimiento medio anual resulta de 19,000 millones de metros cúbicos, en el periodo 1944-1973.



Fig. 3.3. Cuenca de Malpaso (Ramírez, S., 2011).

A continuación, se mencionan algunas obras del proyecto Netzahualcóyotl (Fig. 3.4.):

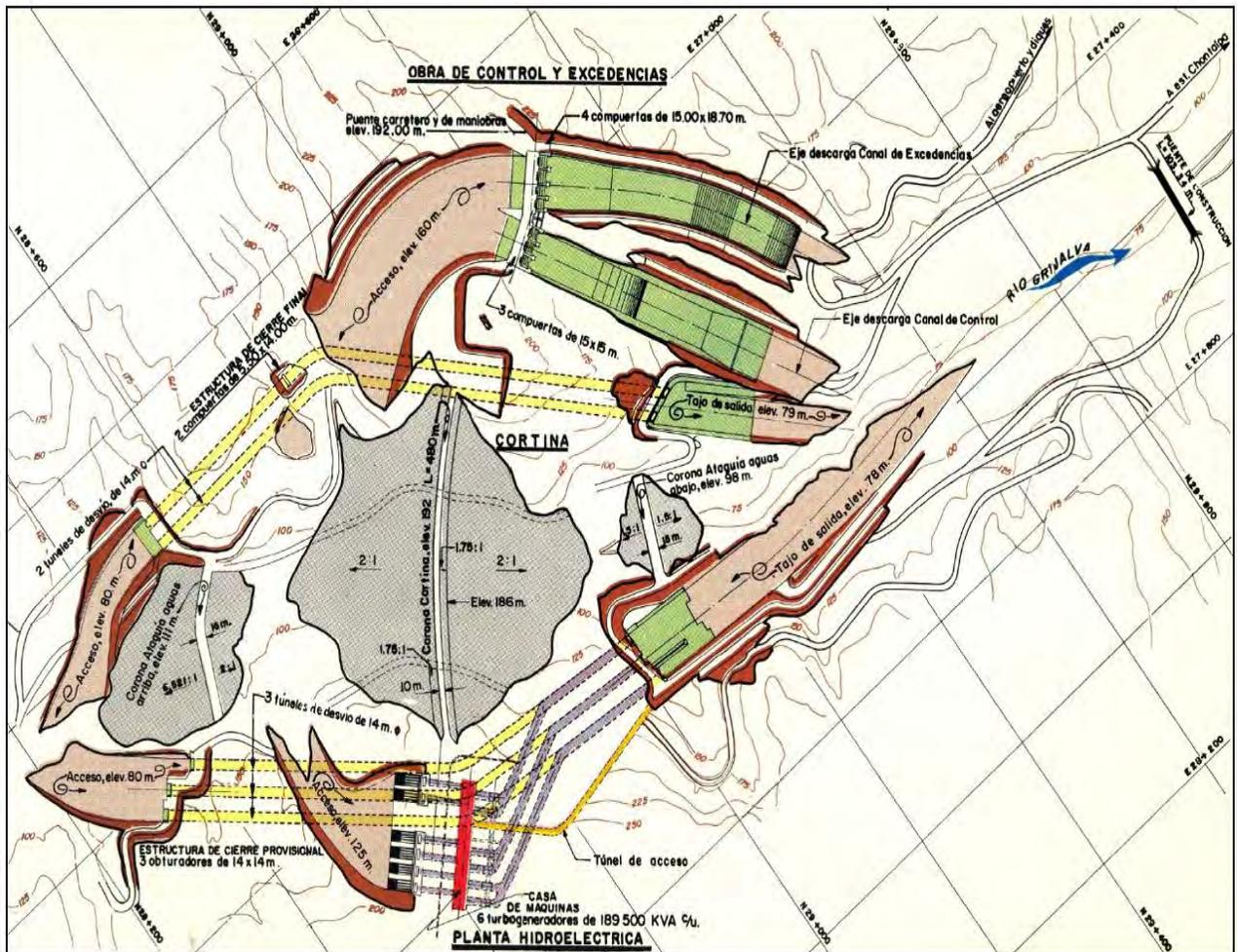


Fig. 3.4. Planta General de la presa Netzahualcóyotl, Malpaso, ((Ramírez, S., 2011).

- VASO DE REGULACIÓN DE CRECIENTES:

Tiene una capacidad de 3,800 millones de metros cúbicos, el súper almacenamiento de 860 millones cúbicos y el volumen previsto para la generación de energía de 7,300 millones de metros cúbicos.

- CORTINA:

Es de 138 metros de altura y tiene 478 metros de longitud en la corona. Está constituida por un corazón impermeable de arcilla compactada, central y simétrico, protegido por filtros, transiciones y respaldos permeables formados con el producto de excavaciones; los taludes exteriores de 2:1 están cubiertos por roca pesada para evitar los efectos de oleaje y la erosión pluvial. El bordo libre es de 5.40 metros y el volumen total de materiales excede de 5 millones de metros cúbicos, (Fig. 3.5.).

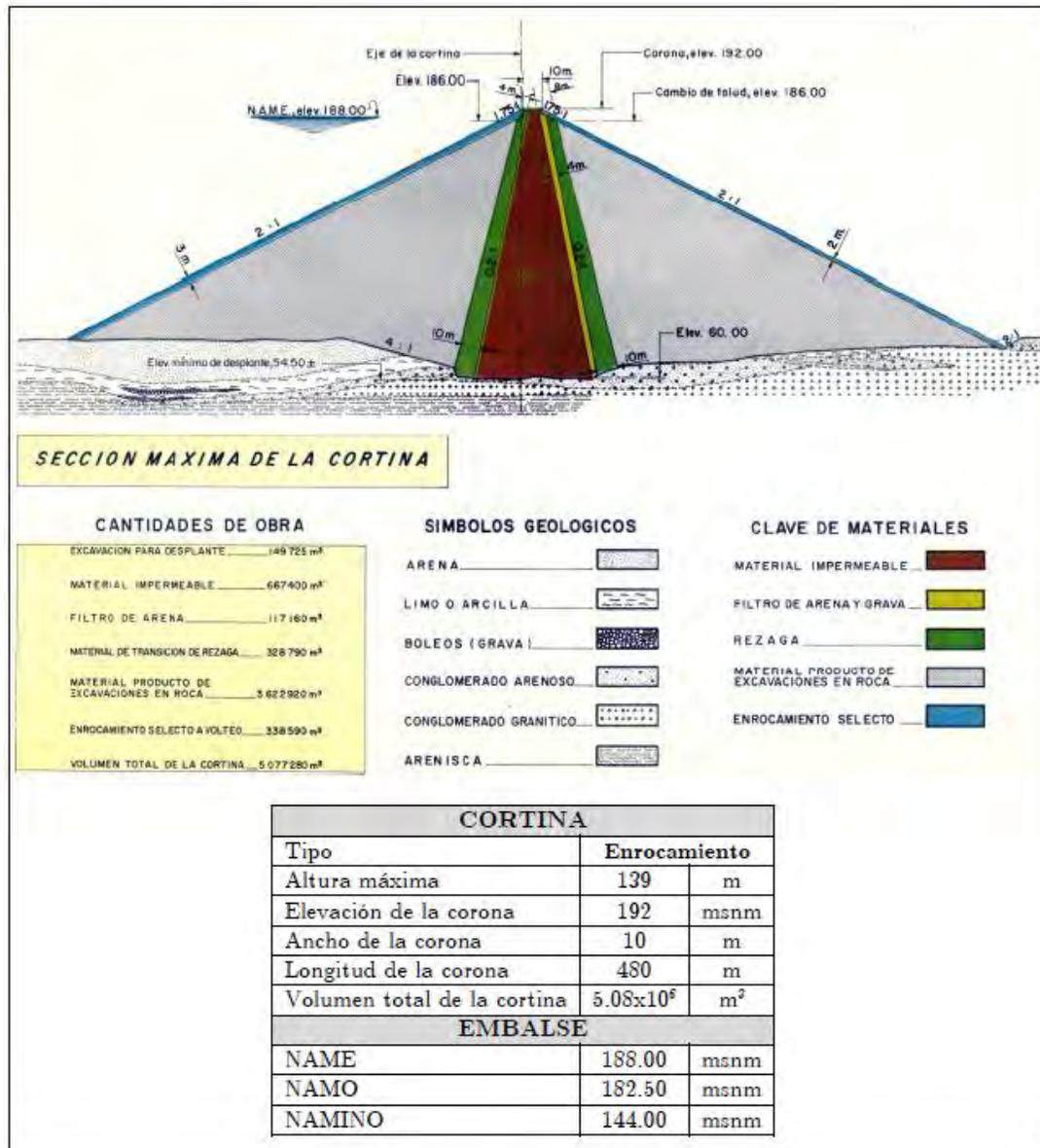


Fig. 3.5. Cortina de la Presa Malpaso (Netzahualcóyotl), (Ramírez, S., 2011).

- OBRA DE REGULACIÓN DE AVENIDAS:

Es un vertedor dotado de 3 compuertas radiales (15 x 15 m) y puede descargar un gasto máximo de 11,000 metros cúbicos por segundo.

- CASA DE MÁQUINAS:

Es subterránea, de 161 m de longitud, 20 m de ancho y 30 m de alto, totalmente revestida de concreto.

Cada unidad generadora tiene un pozo de oscilación, elíptico en sección transversal (10 x 14 m), excavado en roca y revestido. Los transformadores de potencia están ubicados en la

plataforma colindante con la superestructura de la toma y los auxiliares en la subestación localizada a un nivel superior de la ladera derecha.

3.1.3 Geología Local

La región presenta plegamientos constituidos de formaciones marinas del cretáceo y cenozoico pertenecientes al geosinclinal mexicano, con orientación general NW-SE. Predominan fallas de compresión paralelas a la dirección del geosinclinal las cuales están surcando a los sedimentos (Fig. 3.6.).

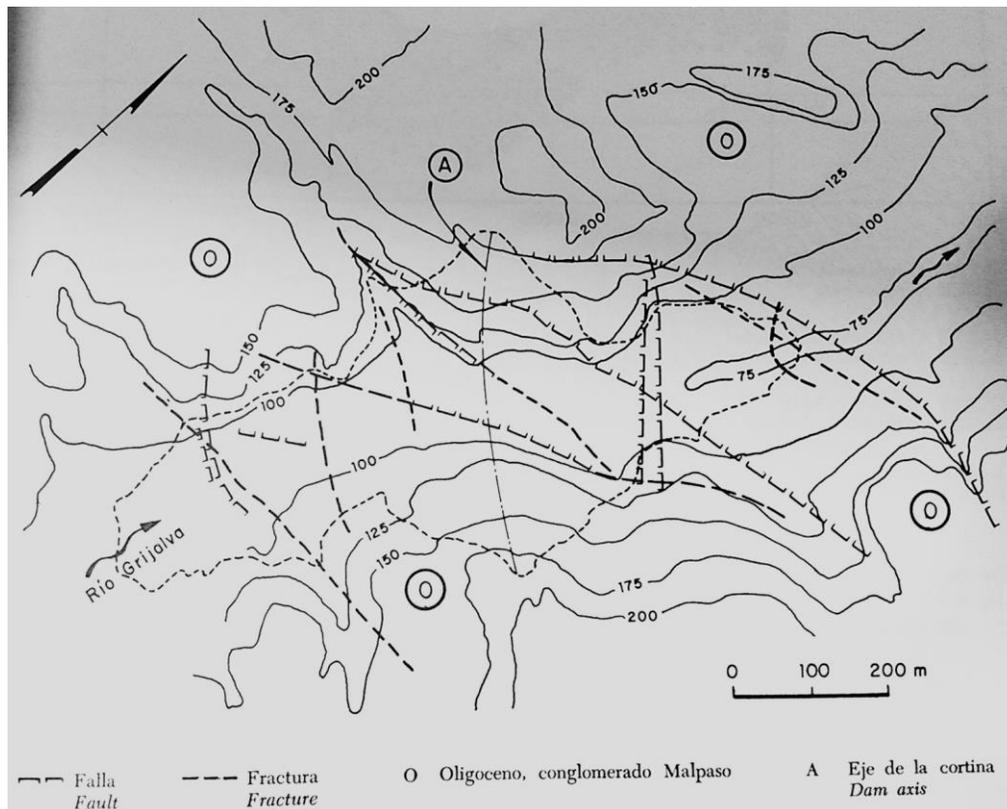


Fig. 3.6. Geología del sitio Malpaso, (Comportamiento de presas construidas en México, 1976).

En orden de edad decreciente, la columna estratigráfica se compone por calizas, lutitas, conglomerados, areniscas y aluviones recientes.

Debido a las condiciones climáticas se tiene un clima tropical húmedo, lo que propicia tener formaciones marinas sometidas a meteorización intensa, dando lugar a los suelos residuales, parcialmente lateríticos, que en el sitio de Malpaso tienen un espesor de hasta 30 m.

Respecto al eje de la cortina (Fig. 3.7.), hasta la profundidad explorada se encontró la serie Conglomerado Malpaso, el cual está constituido por bancos gruesos de conglomerados bien

cementados; la matriz fina es arenarcillosa, no soluble e impermeable. Dentro de esta roca existen lentes de arenisca o de lutitas, muy compactas; su espesor es de 6 m.

El conglomerado aparece cortado por fallas escalonadas de tipo normal, transversales al eje de la boquilla e inclinadas hacia la margen izquierda. Estas fallas se encuentran empacadas con material arcilloso, salvo los tramos superficiales, erosionados por el agua y rellenados con suelos arenosos en estado suelto.

Las partes altas del sitio están cubiertas por suelo residual, producto del intemperismo del conglomerado; el espesor varía de 3 a 18 m.

En el cauce hay un depósito arenoso cuya potencia aumenta hacia aguas arriba y es de 30 m bajo la ataguía.

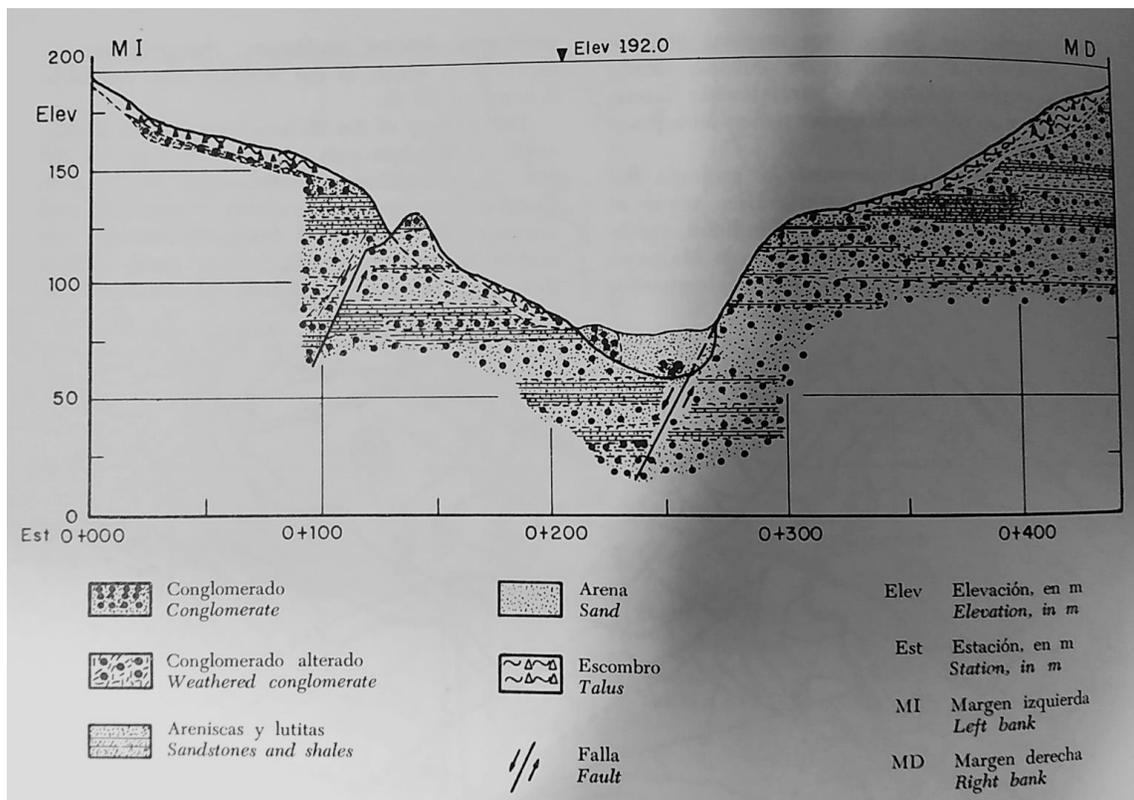


Fig. 3.7. Corte geológico según el eje de la cortina, (Comportamiento de presas construidas en México, 1976).

3.2 PRESA LA ANGOSTURA, DR. BELISARIO DOMÍNGUEZ.



Fig. 3.8. Presa Dr. Belisario Domínguez, La Angostura (Tomada de <https://megaconstrucciones.net/?construccion=presa-angostura>).

3.2.1 Ubicación

La presa Dr. Belisario Domínguez “La Angostura” se ubica en el estado de Chiapas (Fig. 3.8) sobre el cauce del río Grijalva, está situada entre los municipios de Venustiano Carranza, Tzimol y Socoltenango al norte, Concordia y Chicomuselo al sur, Trinitaria y Comalapa al este, Chiapa de Corzo al oeste. Se localiza a 104 km aguas arriba de la Presa Chicoasén. Sus coordenadas geográficas son 16°24’03” de latitud norte y 92°46’40” de longitud oeste.

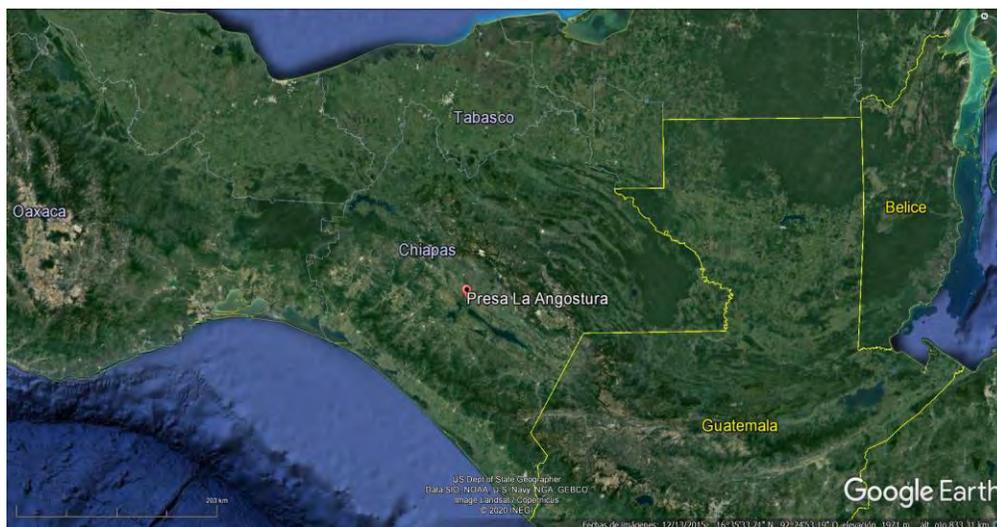


Fig. 3.9. Ubicación Presa La Angostura, Chiapas.

3.2.2 Características de la Presa

La presa Dr. Belisario Domínguez “La Angostura” (Fig. 3.9), fue el segundo proyecto en construirse, sus principales usos son el control de avenidas, generación de energía hidroeléctrica, riego agrícola y consumo humano, pesca y turismo.

Es considerada como la de mayor capacidad de la República Mexicana, capta las aguas de la parte alta del río Grijalva, tiene una capacidad efectiva instalada de generación de 900 MW.

La cuenca propia de La Angostura (Fig. 3.10) comprende un área aproximada de 18,099 km².



Fig. 3.10. Cuenca de La Angostura, (Ramírez, S., 2011).

A continuación, se mencionan algunas obras del proyecto La Angostura (Fig. 3.11):

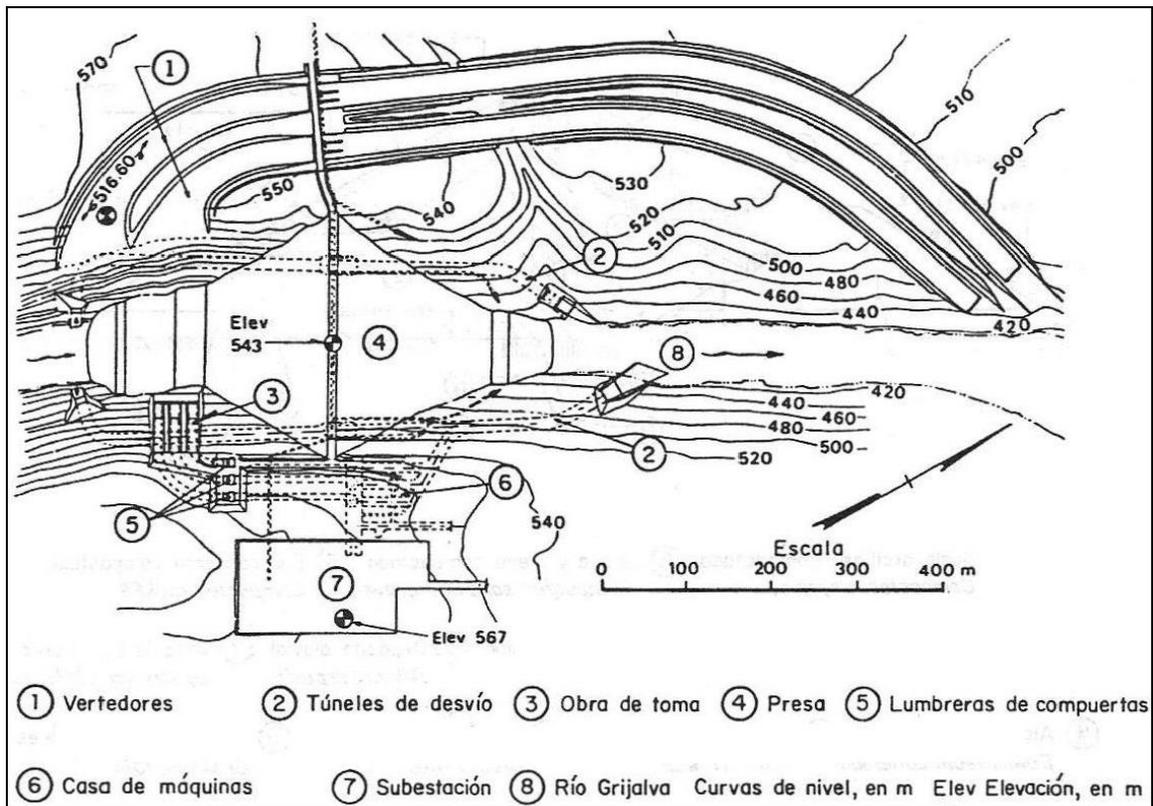


Fig. 3.11. Planta General de la presa La Angostura, (Ramírez, S., 2011).

- CORTINA

Es una presa de tierra y enrocamiento, con altura máxima de 145 m, tiene un núcleo central de arcilla y respaldos amplios de enrocamiento, arena y grava. Los taludes exteriores aguas arriba son de 2:1 y aguas debajo de 1.8:1, (Fig. 3.12).

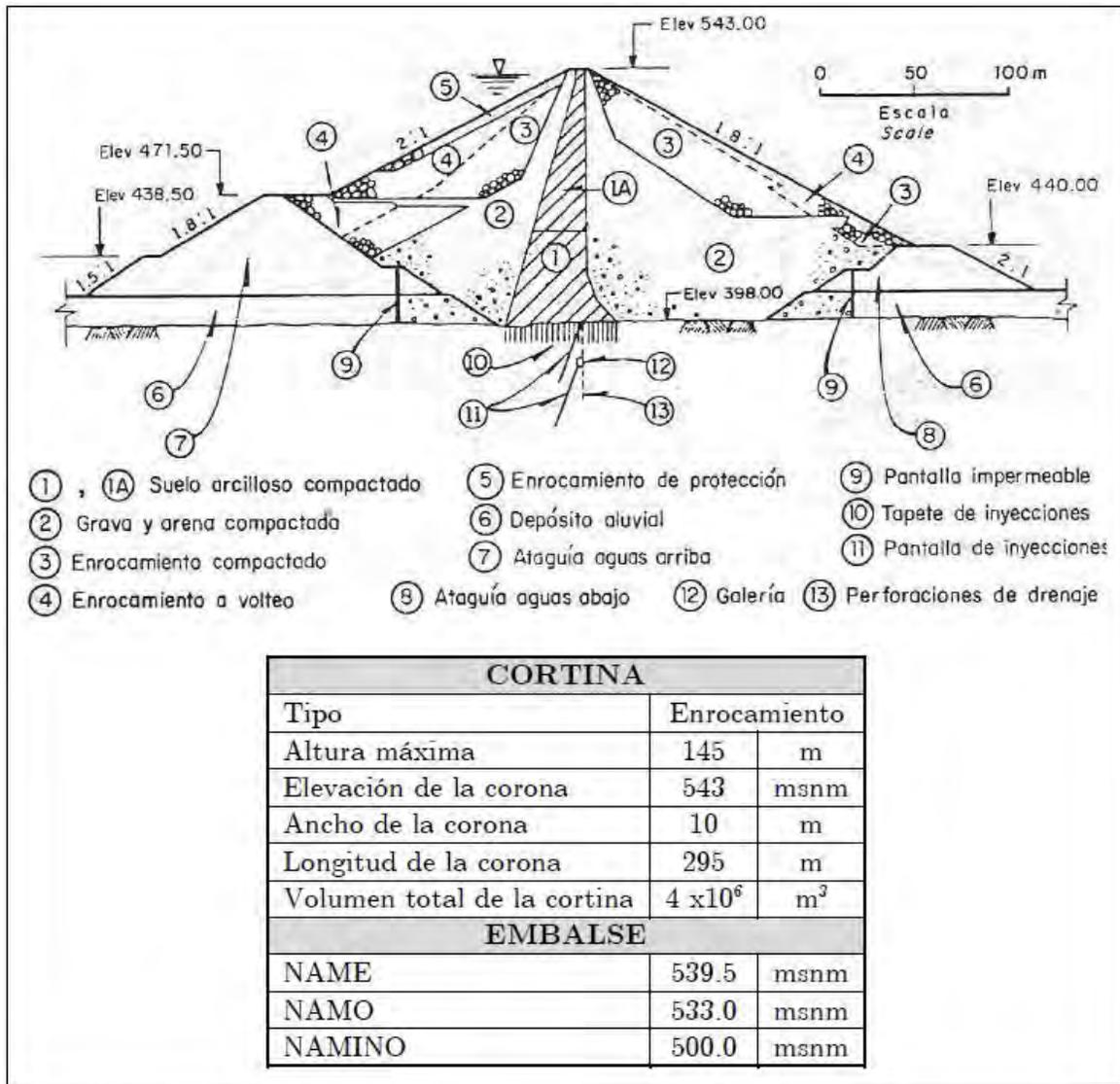


Fig. 3.12. Sección de la cortina de la presa La Angostura, (Ramírez, S., 2011).

- VASO DE REGULACION DE CRECIENTES

Tiene una capacidad total de almacenamiento del embalse de $18 \times 10^9 \text{ m}^3$, de los cuales 7×10^9 se requieren para regular avenidas.

- OBRA DE EXCEDENCIAS

Compuesta de dos vertedores ubicados en la margen izquierda, son dos canales abiertos dotados de compuertas radiales y saltos de esquí, la longitud de los canales es aproximada de 800 m. Se diseñaron para una descarga máxima de 6000 metros cúbicos por segundo.

- PLANTA HIDROELÉCTRICA

Se localiza en la margen izquierda, consta de una obra de toma, conducción a presión y casa de máquinas. El diámetro de la tubería a presión es de 8.7 m. La casa de máquinas se construyó en una caverna de 22 m de ancho, 40 m de altura y 100 m de longitud, aproximadamente. Contiene tres unidades de 150 MW y cuatro transformadores. Las turbinas están alimentadas por túneles de 6.5 m de diámetro; las compuertas de operación y emergencia se instalaron en tres lumbreras excavadas aguas abajo de la obra de toma.

- OBRA DE DESVÍO

El río fue desviado por medio de dos túneles revestidos de concreto, de 13 m de diámetro interior, uno por la margen izquierda y otro por la margen derecha, y dos ataguías, de 60 m de altura la de aguas arriba y 30 m la de aguas abajo.

3.2.3 Geología local

La zona del proyecto se ubica a través del cañón de La Angostura, labrado en formaciones sedimentarias estratificadas del jurásico y cretáceo (calizas y lutitas). Estos estratos buzanan hacia el NE con una inclinación media de 8 grados.

En la región existen calizas cársticas que afloran en el vaso 3 km aguas arriba, pero bajo la presa se localizan 200 m de profundidad subyaciendo a capas de calizas puras o arcillosas (Fig. 3.13).

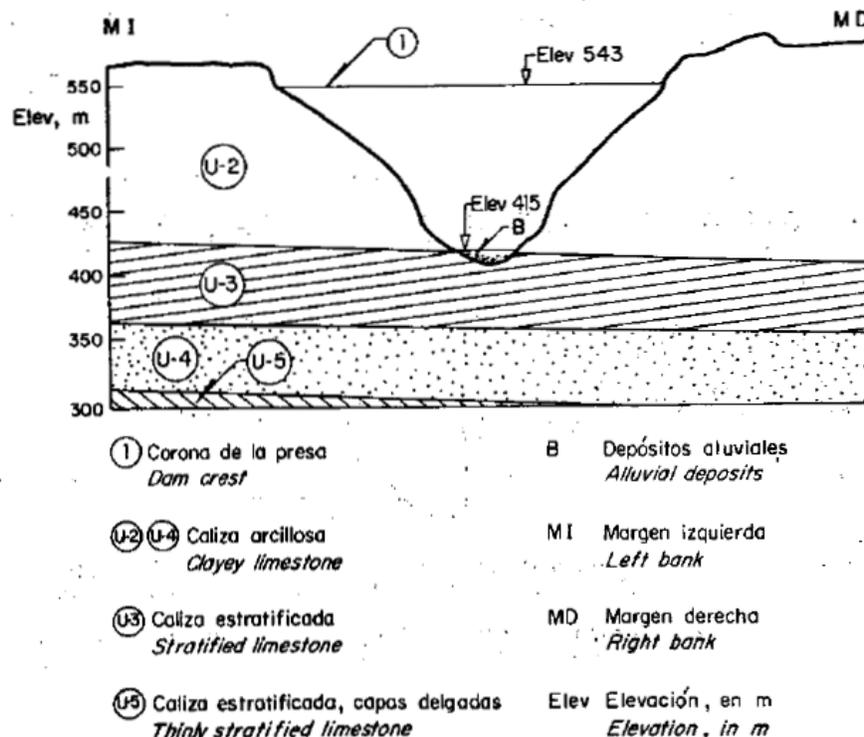


Fig. 3.13. Perfil geológico a lo largo del eje de la presa La Angostura.

La geología de esta zona está delimitada por los ríos Grijalva y Santo Domingo, la Figura 3.14 muestra a grandes rasgos la geología de la región, indicando las fronteras aproximadas de las diferentes unidades geológicas y la columna estratigráfica en un corte S-N.

Se encuentra una unidad litológica UD, notable por su carsticidad la cual subyace a otras de caliza pura o arcillosa. En el sitio de La Angostura, las capas de caliza arcillosa están, a su vez cubiertas por formaciones arrecifales y lutitas.

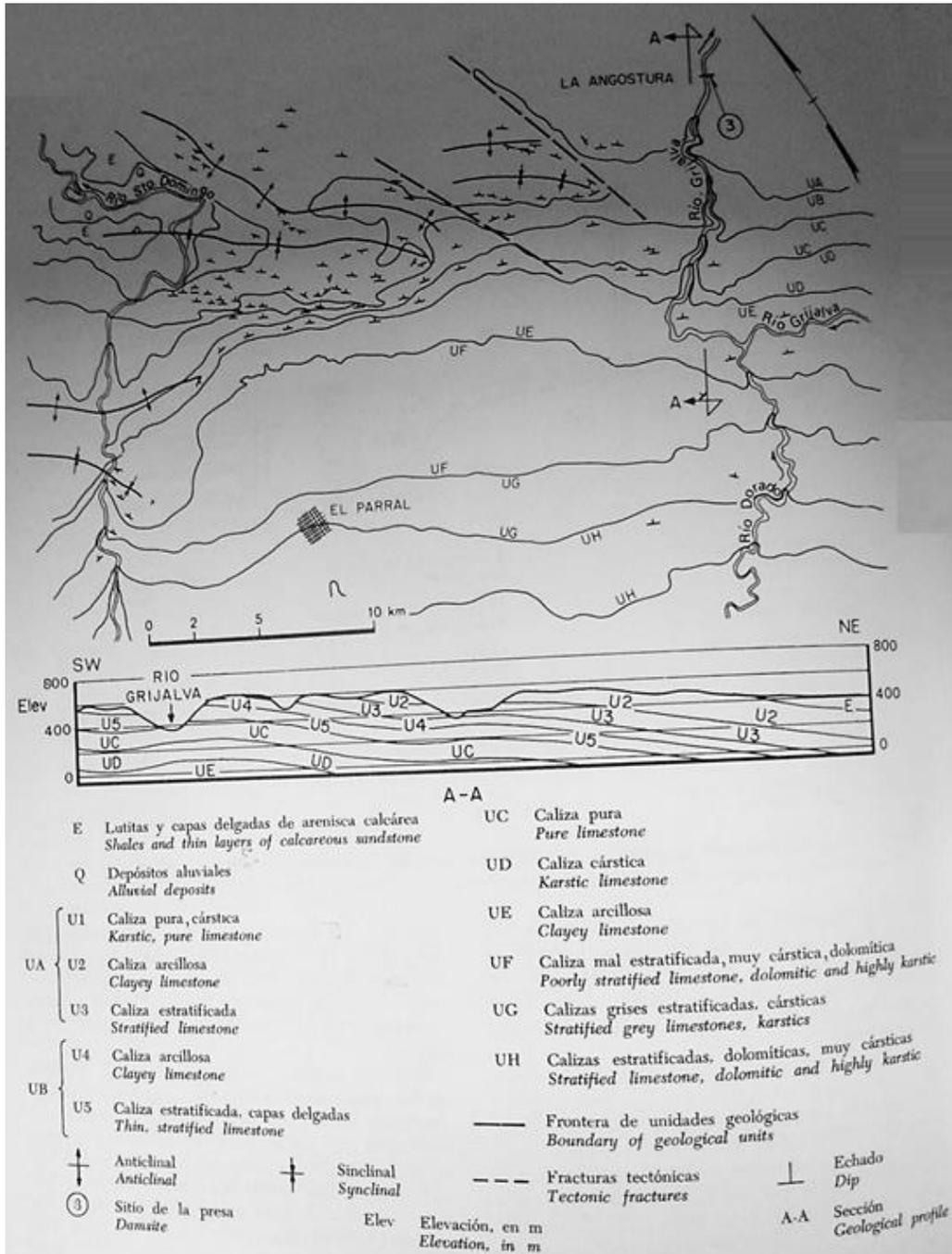


Fig. 3.14. Geología de la región comprendida por los ríos Santo Domingo y Grijalva, (Tomada de Comportamiento de presas construidas en México, 1976).

3.3 PRESA ING. MANUEL MORENO TORRES, CHICOASÉN



Fig. 3.16. Presa Ing. Manuel Moreno Torres, Chicoasén (Tomada de Diez Noticias <https://images.app.goo.gl/mh147yr8k1TKXUW48>).

3.3.1 Ubicación

La presa Ing. Manuel Moreno Torres, Chicoasén, llamada así en honor a un ilustre ingeniero, quien fue director general de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) durante el sexenio de (1958-1964). Ubicada en el estado de Chiapas (Fig. 3.15), en el municipio Chicoasén. Se localiza a 104 km aguas abajo de la presa La angostura. Sus coordenadas geográficas son 16°56'29" de latitud norte y 93°06'03" de longitud oeste.

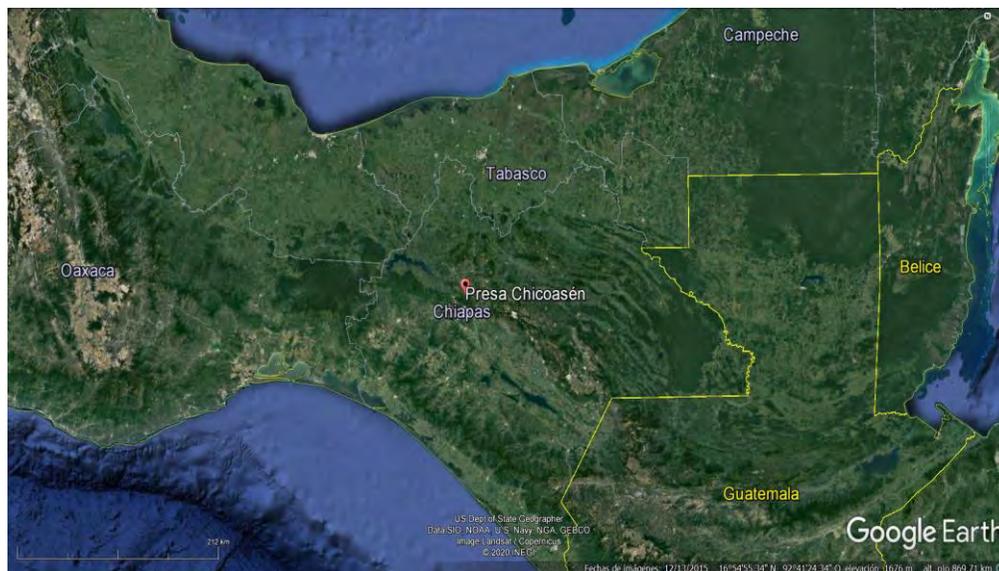


Fig. 3.15. Ubicación de la Presa Chicoasén, Chiapas.

3.3.2 Características de la Presa

La presa Ing. Manuel Moreno Torres también conocida como Chicoasén (Fig. 3.16) fue construida en los años de 1977 a 1980. Fue la tercera presa en ser construida del Plan Integral del río Grijalva. Se localiza a 80 km aguas abajo de la presa La Angostura y 55 km aguas arriba de la presa Malpaso.

La cuenca propia de Chicoasén comprende un área aproximadamente de 7,194 km², área comprendida aguas abajo de la Presa La Angostura hasta la presa Chicoasén (Fig. 3.17).



Fig. 3.17. Cuenca de la presa Chicoasén (Tomada de Ramírez, S., 2011).

La presa se encuentra en la región hidrológica número 30 (RH30), Grijalva-Usumacinta. Esta región es la más húmeda del país y aloja a los ríos más caudalosos; el río Usumacinta y el río Grijalva, ambos desembocan en el Golfo de México.

El río Grijalva nace cerca del volcán Tacaná en la República de Guatemala, entra a México recorriendo la depresión central de Chiapas.

Esta presa con sus características hidrológicas, topográficas, geológicas y económicas hacen que esta central hidroeléctrica sea una de las más poderosas para generar energía eléctrica anual en México.

Respecto al régimen pluviométrico presenta dos periodos bien definidos: el primero en los meses de julio a noviembre con precipitaciones máximas, esto a consecuencia de las perturbaciones ciclónicas generadas en el Golfo de México y el Mar Caribe, a las cuales se agregan ocasionalmente las del Océano Pacífico. El segundo en los meses de diciembre a junio en los cuales se presenta el estiaje.

La presa Chicoasén es la tercera en construirse del Plan Integral del río Grijalva.

Respecto a su construcción se tenían dos alternativas. La primera proponía una presa de concreto tipo arco-bóveda, y en la segunda un terraplén de materiales graduados.

Se optó por la opción de materiales graduados debido a la presencia de una falla geológica próxima a la cortina de Chicoasén (falla Chicoasén).

Finalmente, este proyecto está representado por las siguientes obras (Fig.3.18):

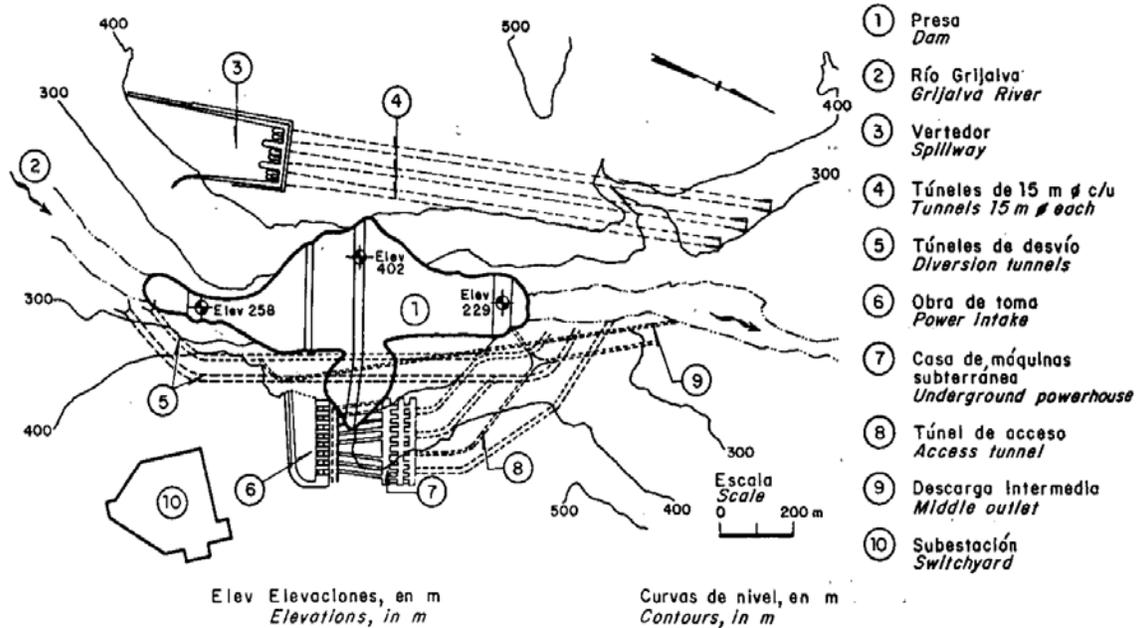


Fig. 3.18. Vista en planta de la presa Chicoasén (Tomada de CFE, SRH & UNAM., 1976).

- CORTINA

El diseño de la cortina fue del tipo de tierra y enrocamiento, (Fig. 3.19).

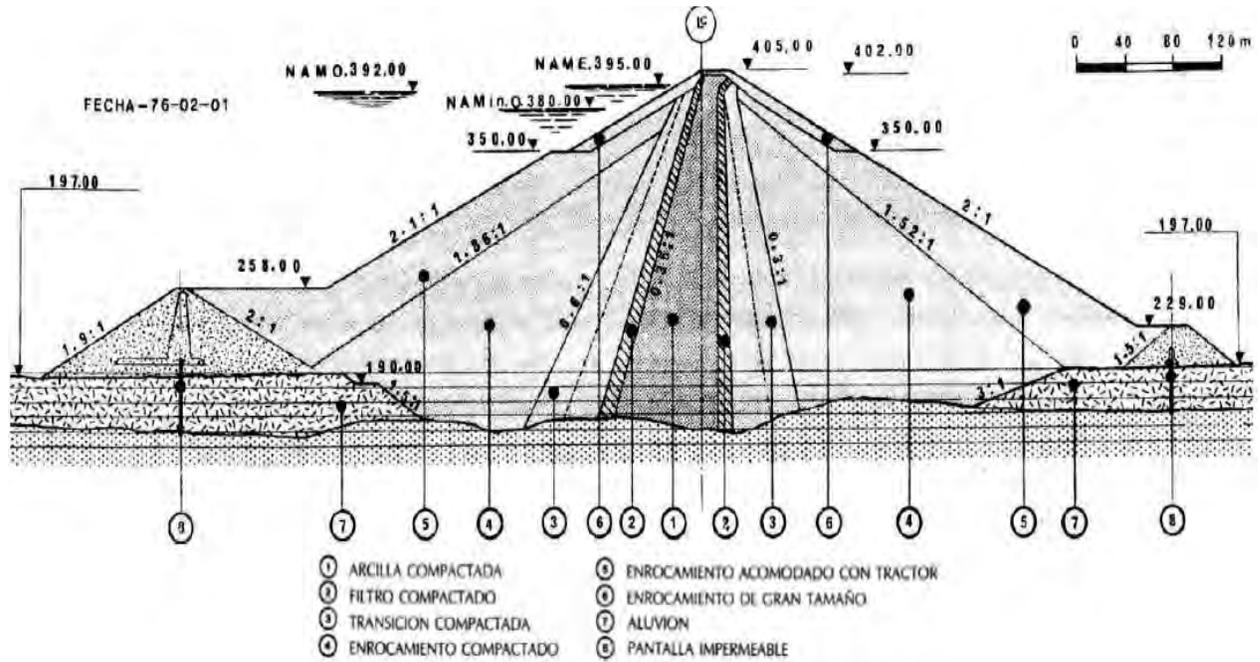
La cortina tiene una altura de 202 m sobre el fondo del río y una altura máxima sobre la roca basal de 261 m, el núcleo impermeable fue construido con arena arcillosa con alto contenido de grava, la fracción fina, las arcillas fueron de baja plasticidad.

Cabe mencionar que estos materiales fueron tratados para obtener la granulometría y contenido de agua requerido, colocados en capas de 25 cm de espesor, compactadas con rodillo vibratorio de almohadillas de 7 toneladas. Para los filtros se utilizó arena bien graduada, colocándolas en capas de 40 cm de espesor, mezcladas con motoconformadora y compactadas con rodillo liso vibratorio de 10 ton. Para las transiciones utilizaron gravas producto de trituración y cribado con tamaños máximo de 15 cm; fueron colocadas en capas de 60 cm densificadas con rodillo vibratorio de 12 ton. Los respaldos de protección están formados por masas de enrocado de roca caliza de buena calidad proveniente de canteras, los tamaños utilizados máximos fueron entre 40 y 50 cm, colocados en capas de 60 cm densificadas con rodillo vibratorio de 12 ton. Las zonas de volteo se extendieron con tractor

en capas de 1 m de espesor y los fragmentos más grandes se arrastraron a los taludes exteriores.

Chicoasén tiene incorporada al cuerpo de la cortina dos ataguías para el desvío del río, con alturas de 58 m y 29 m aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

El volumen del vaso es de $1680 \times 10^6 \text{ m}^3$ y la capacidad de descarga del vertedor es de $17,000 \text{ m}^3/\text{s}$.



CORTINA		
Tipo	Enrocamiento	
Altura máxima	250	m
Elevación de la corona	405	msnm
Ancho de la corona	25	m
Longitud de la corona	584	m
Volumen total de la cortina	14.51×10^6	m^3
EMBALSE		
NAME	395	msnm
NAMO	388	msnm
NAMINO	380	msnm

Fig. 3.19. Cortina de la presa tipo materiales graduados, (Tomada de Ramírez, S., 2011).

- OBRA DE DESVÍO

La obra de desvío consistió en la realización de dos túneles excavados en la margen derecha, de sección portal sin revestir, de 13 m de ancho y 13 m de altura. Las ataguías de materiales graduados forman parte de la cortina, la de aguas arriba con 61 m de altura y de 26 m la de aguas abajo.

Al realizar la obra de desvío se vio favorable ya que se cerró el embalse de la presa La Angostura y esto permitió poder realizar dichas obras.

- OBRA DE EXCEDENCIAS

Ubicada en la margen izquierda, consta de tres vertedores tipo túnel, controlados por compuertas radiales con dimensiones de 8.40 m de ancho por 19 m de altura. Para el acceso del agua se excavo un canal a cielo abierto de ancho variable. La cresta del cimacio, tipo Creager, tiene la elevación de 373 m, el cual permite evacuar un gasto de 15,000 m³/s por túnel, bajo una carga máxima de 22 m.

Los túneles de descarga tienen una dimensión de 17 m de diámetro revestidos de concreto para quedar con diámetro de 15 m, su longitud es aproximadamente de unos 900 m con una pendiente de 0.0322. Al final de estos vertedores se construyó la salida en forma de cubeta o de lanzamiento (salto de esquí) (Fig. 3.20).

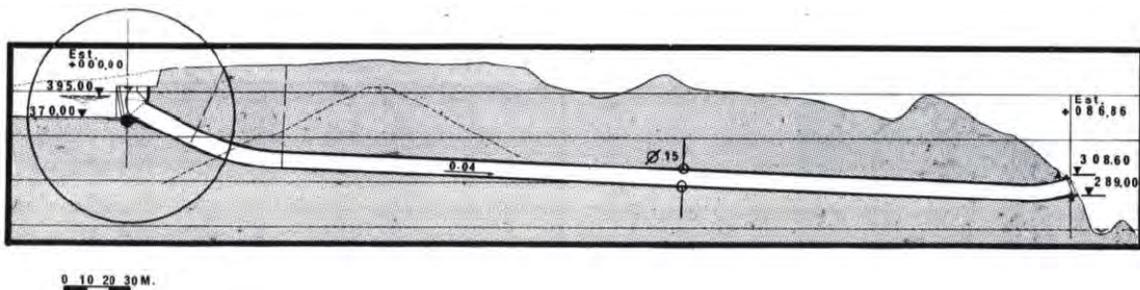


Fig. 3.20. Perfil del vertedor tipo túnel, presa Chicoasén, (Tomada de Ramírez, S., 2011).

- PLANTA HIDROELÉCTRICA

Ubicada en la margen derecha, está compuesta de la obra de toma, que consiste en un canal de acceso y 8 tomas independientes, diseñada con 8 estructuras de toma, una para cada grupo generador, provistas de rejillas y de una compuerta automática de accionamiento hidráulico rápido de 6.70x6.70 m. La casa de máquinas es una obra subterránea con dimensiones de 199 m de longitud, 20.5 m de ancho y 43 m de altura. Se diseñó para alojar 8 grupos, cada uno constituido por una turbina tipo Francis, con capacidad de 306 MW cada una (Fig. 3.21).

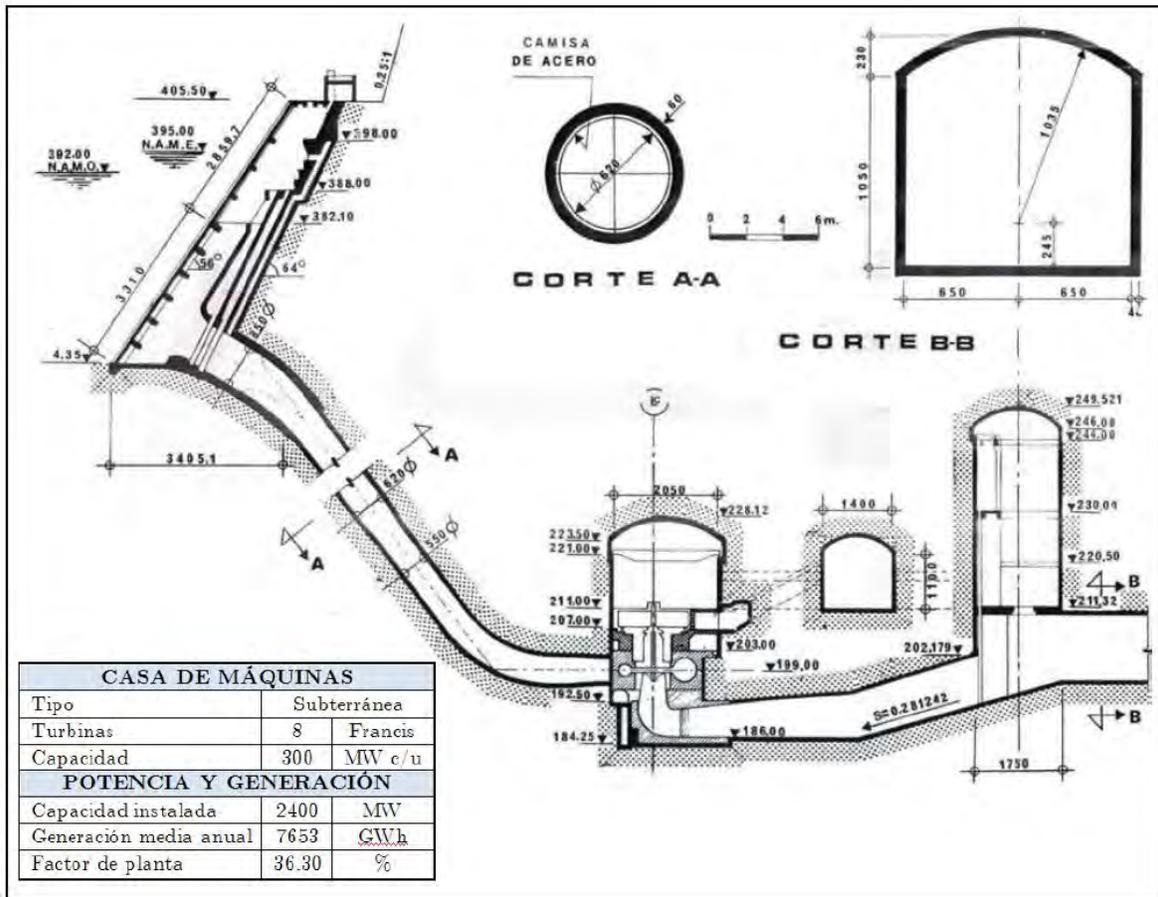


Fig. 3.21. Planta hidroeléctrica, presa Chicoasén, (Tomada de Ramírez, S., 2011).

3.3.3 Geología local

El cañón de Chicoasén se formó por erosión en el flanco NE del anticlinal de Chicoasén. La topografía donde está el vaso es muy abrupta, ya que gran parte se ubica dentro del cañón del Sumidero. Este anticlinal de rumbo NW está delimitado y cortado hacia el norte por la falla Chicoasén-Malpasso, sin embargo, al SE el anticlinal de Chicoasén desaparece, justo al norte del río Hondo donde se une este al último con el río Grijalva.

El Macizo rocoso en la boquilla de la cortina es una formación rocosa sedimentaria en la que existen tres unidades geológicas principales (Fig. 3.22):

- Unidad U1 constituida por calizas estratificadas de espesores variables constituida por capas de arcilla y lutita.
- U2, ubicada bajo la U1, está constituida por una caliza masiva sin estratificaciones de color blanco.
- U3, ubicada bajo la U2, constituida de calizas estratificadas de color gris oscuro, separadas por capas de arcillas carbonosas.

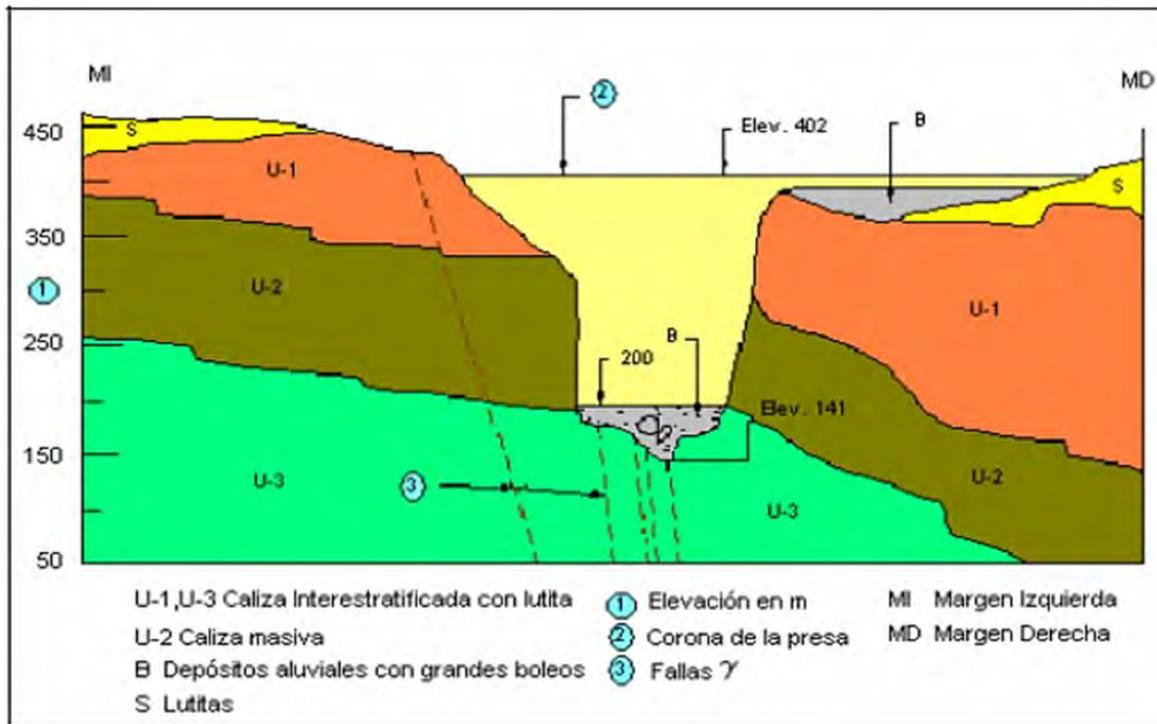


Fig. 3.22. Perfil geológico a lo largo del eje de la presa Chicoasén (Tomada de García, G., 2016).

Estas formaciones del cretácico medio y superior están cubiertas por lutitas del eoceno, a lo largo de 2.5 km del Cañón de Chicoasén, las márgenes están afectadas por tres sistemas de fallas denominadas: alpha, beta y gamma (Fig. 3.23).

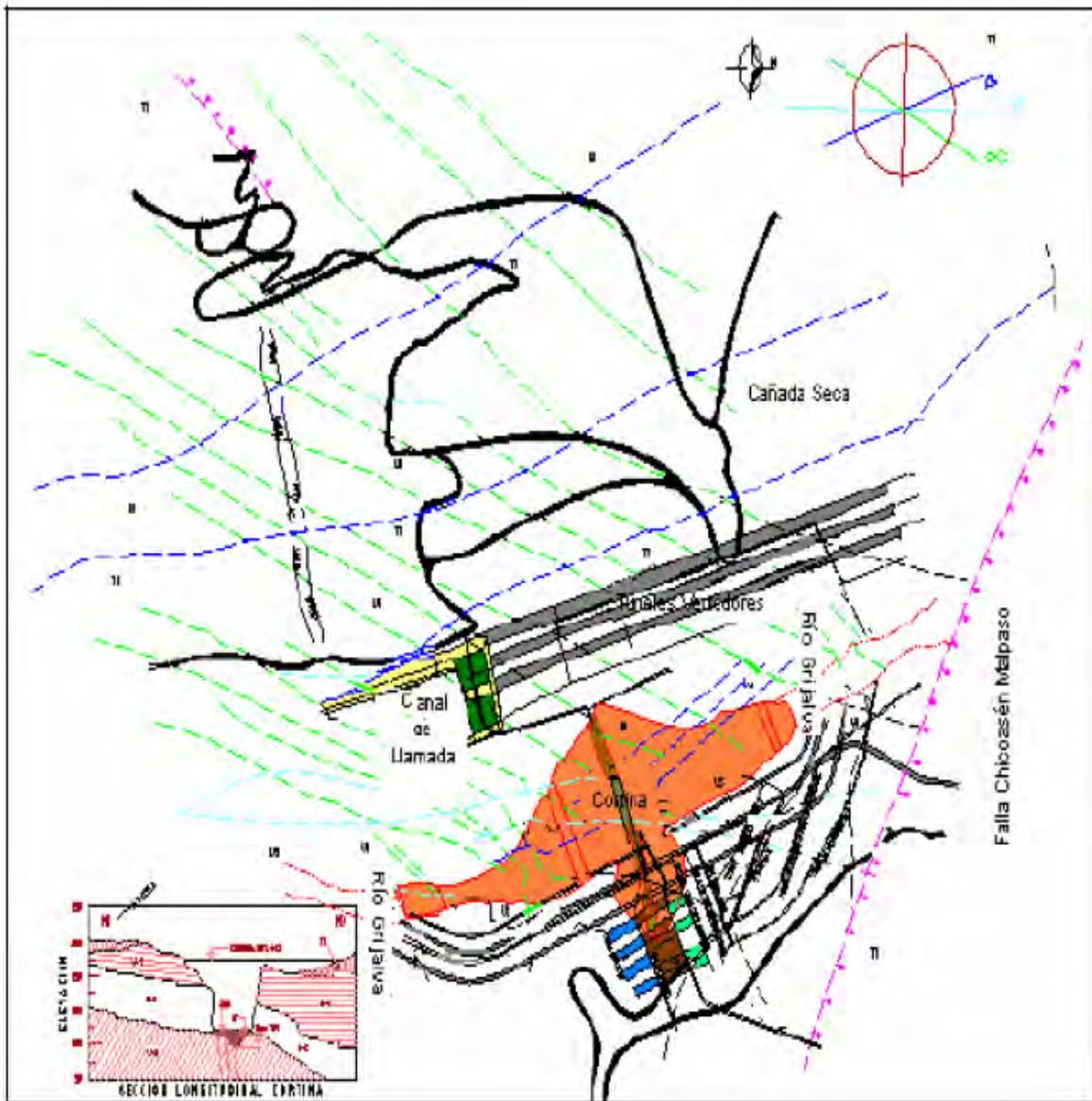


Fig. 3.23. Fallas α , β , γ , (Tomada de García, G., 2016).

- Alfa: con un rumbo general NE-SW con una inclinación al SE a la vertical variable de 70° y muy alabeadas tanto en el sentido horizontal como vertical. Producen desplazamientos de 3 a 50 m en las diferentes unidades y se produjeron por arrastre de la falla Chicoasén, arqueándose el cañón y provocando el hundimiento del bloque hacia el sur (Fig. 3.24).

Este arrastre produjo varias flexuras o cambio brusco en la inclinación de las capas. Estos cambios de inclinación brusca produjeron las flexuras, arqueamientos muy apretados que dan lugar a zonas de concentración de esfuerzos, donde se produjo fracturamiento muy fino denominado microfracturamiento.

En respuesta a estos plegamientos debido a que son muy apretados y a la diferencia de su capacidad para deformarse respecto a las rocas estratificadas de las unidades U1 y U3 y de las rocas de la unidad U2, se han producido los siguientes efectos:

1. Las rocas estratificadas intercaladas con capas de arcilla pueden arquearse acomodando su forma, deslizando unas capas sobre otras debido a que la estratificación representa planos de debilidad y a la misma plasticidad de las capas arcillosas, por este efecto y por la diferencia de propiedades mecánicas que existe en el paquete de rocas estratificadas da lugar a que el fracturamiento se engrose.
2. En las rocas competentes de la unidad U2 por su carácter masivo el fallamiento es limpio, es decir sin halo de fracturamiento importante.

La unidad U1 se ve afectada severamente formando cuñas y zonas quebradas a los lados de las fallas en la unidad U1 estratificada. La unidad U2 no presenta zonas fracturadas a los lados.

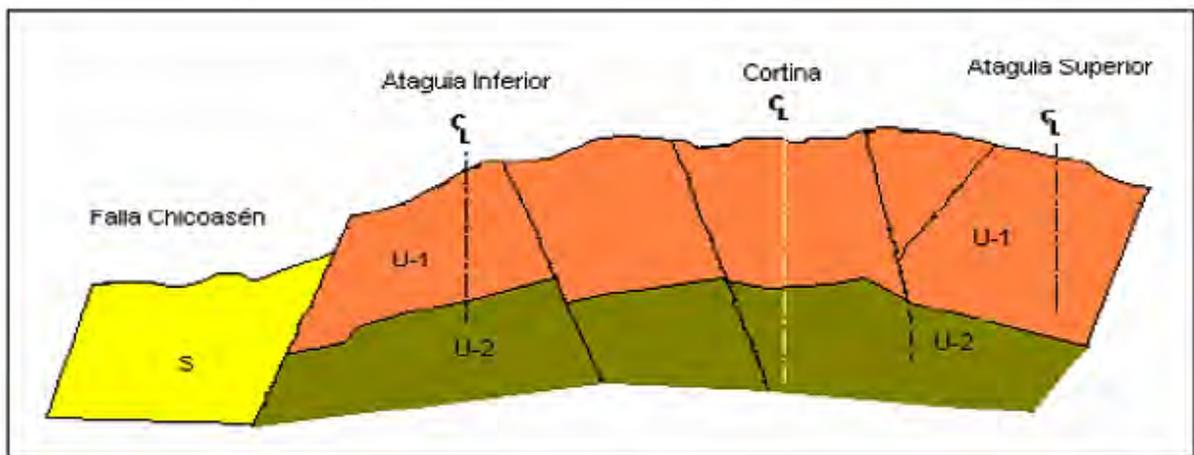


Fig. 3.24. Efecto de arqueamiento por la falla Chicoasén (Tomada de García, G., 2016).

- Beta: forman esencialmente una X, con las fallas alfa, son menos frecuentes y presentan los mismos efectos sobre las unidades que el sistema alfa.
- Gamma: constituyen una zona de debilidad paralela a gran parte del cañón. A través de estas fallas se ha efectuado la descompresión de las laderas al erosionarse el cañón; y su efecto en las unidades de roca es similar al de las fallas Alfa.

Las exploraciones en diferentes sitios de las paredes del cañón han probado que no se ha formado carsticidad de importancia a través de los sistemas de fallas y fracturas.

Es importante mencionar, que las fallas Chicoasén-Malpaso y Muñiz se hunden en capas de cenizas muy delgadas no disturbada (rotas por las fallas) y que datan del Pleistoceno Medio

(5×10^6 años por el método Potasio-Argón). Por lo que es posible definir que las fallas han estado inactivas por lo menos todo este periodo y concluyentemente inactivas para la obra.

3.2 PRESA ÁNGEL ALBINO CORZO, PEÑITAS



Fig. 3.26. Presa Ángel Albino Corzo, Peñitas, (Tomada de <https://images.app.goo.gl/ZUCSofGz472d54Rv5>).

3.4.1 Ubicación

La Presa Ángel Albino Corzo, Peñitas, ubicada en el estado de Chiapas (Fig. 3.25) sobre el río Grijalva, situada en el municipio de Ostucán, se localiza a 72 km aguas debajo de la presa Malpaso. Sus coordenadas geográficas son 17°26'42" de latitud norte y 93°27'28" de longitud oeste.

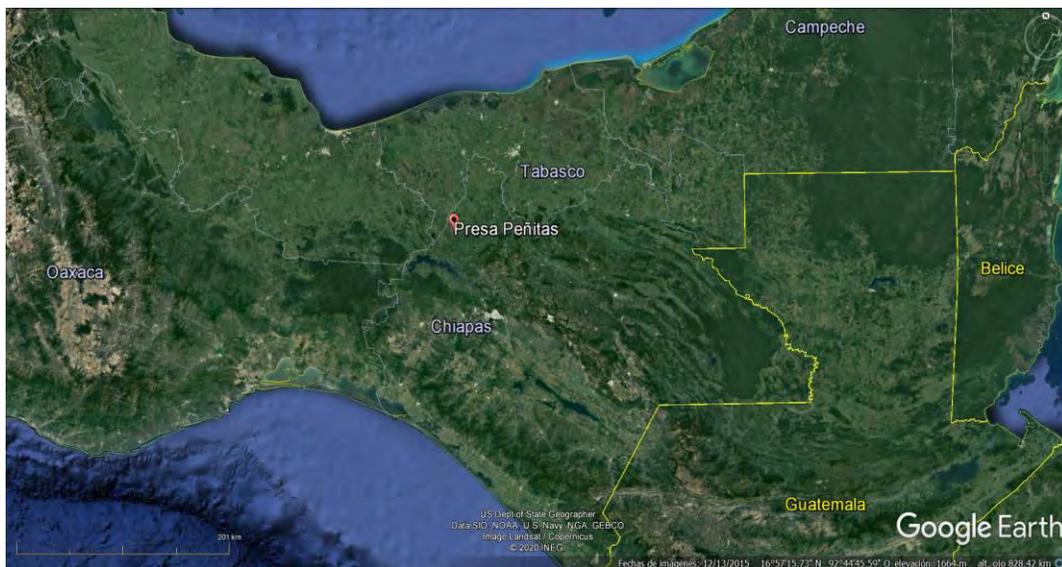


Fig. 3.25. Ubicación de Presa Peñitas, Chiapas.

3.4.2 Características de la Presa

La presa Peñitas (Fig. 3.26), fue la última presa en construirse sobre el cauce del río Grijalva. Se construyó entre los años de 1979 a 1987. La cuenca propia de Peñitas comprende un área aproximada de 1402 km², área comprendida aguas debajo de la Presa Malpaso hasta dicha presa (Fig. 3.27).



Fig. 3.27. Cuenca de Peñitas (Tomada de Ramírez, S., 2011).

La construcción del proyecto cuenta con las siguientes obras (Fig. 3.28):

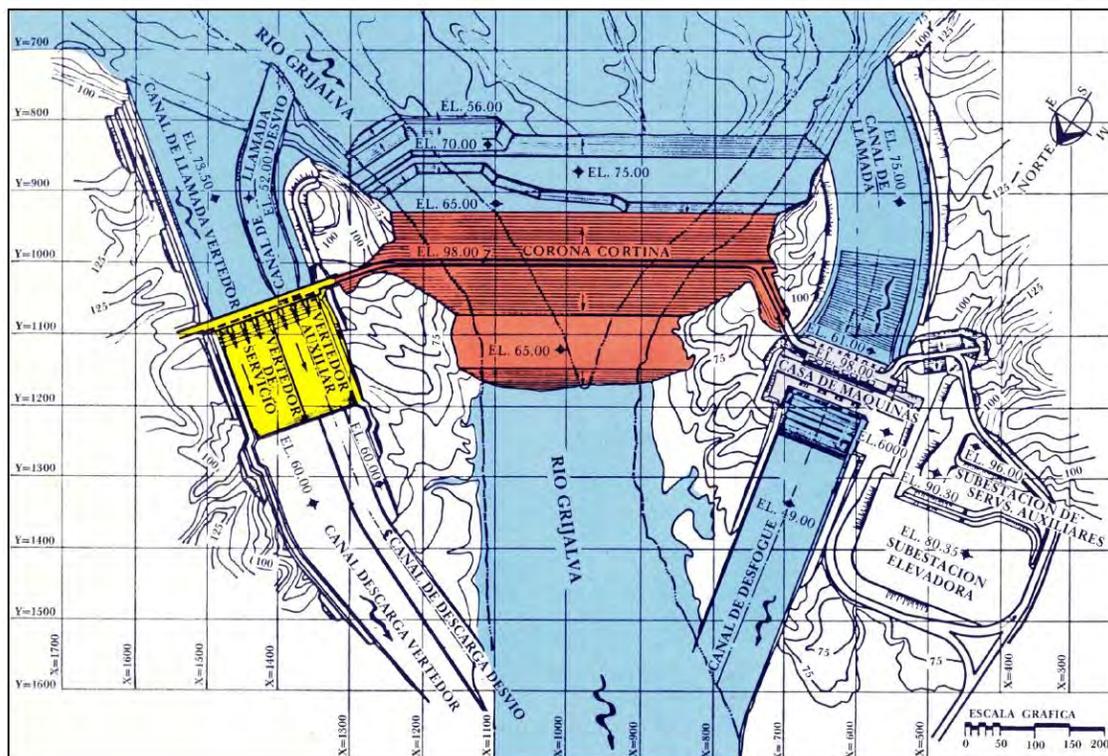


Fig. 3.28. Planta general de la presa Ángel Alvino Corzo, Peñitas, (Tomada de Ramírez, S., 2011).

- CORTINA

Su construcción se inició en 1890, comprende de una altura de 43 m de altura, es de tierra y enrocamiento con núcleo central de arcilla compactada (Fig. 3.29). Su volumen es de $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$, de los cuales $250\,000 \text{ m}^3$ corresponden al corazón impermeable. Está cimentada sobre aluvión mejorado mediante compactación dinámica y contó con una pantalla plástica de 55 m de profundidad máxima y 420 m de longitud.

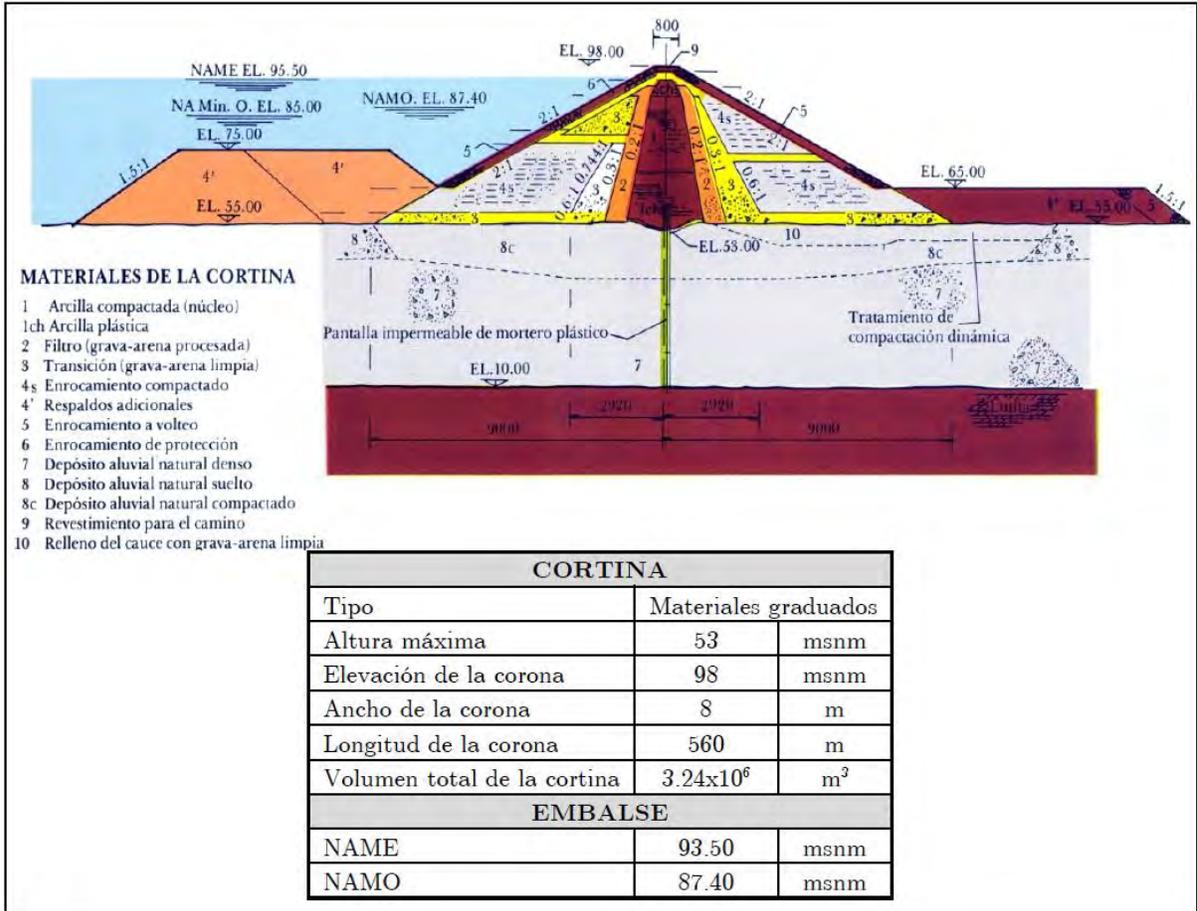


Fig. 3.29. Cortina de la Presa Peñitas, (Tomada de Ramírez, S., 2011).

- OBRA DE EXCEDENCIA

La obra de excedencias se ubica en la margen derecha, está constituida por un canal de llamada, la obra de control y dos canales de descarga. El río fue desviado por un canal con capacidad de $4230 \text{ m}^3/\text{s}$, aprovechando las obras del vertedor (Fig. 3.30), los dos vertedores cuentan con cuatro puertas radiales cada uno de 14.5 m de ancho por 15 m de altura. La cresta del vertedor se fijó a una elevación de 76.50 m, la longitud total de la cresta es de 116 m y permite evacuar un gasto de $18700 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que equivale a $9350 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada vertedor.

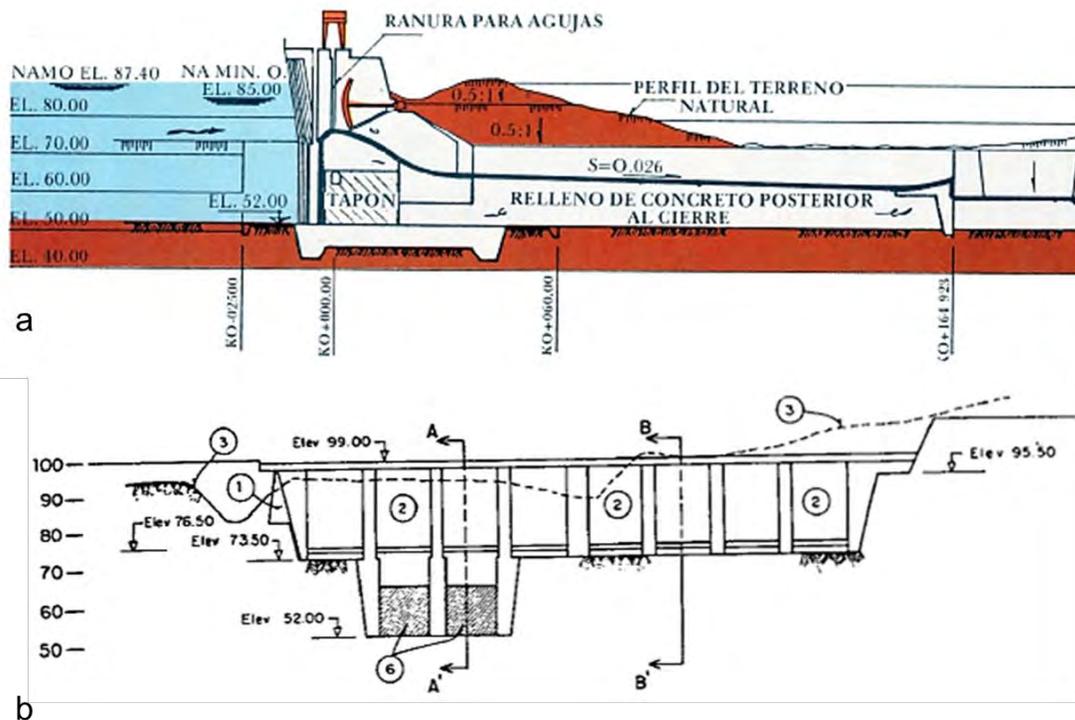


Fig.3.30. Vertedor de la Presa Peñitas: a) Vista de perfil del vertedor, b) Vista del vertedor desde aguas arriba, (Tomada de Ramírez, S., 2011; CFE, 1985).

- OBRA DE DESVÍO

El cauce del río solamente fluía en dirección del brazo derecho, lo que permitió avanzar con la cortina por la margen izquierda. Paralelamente al avance de la cortina se excavo un canal de desvío a cielo abierto de 35 m de ancho en el margen derecha, lo que permitió concluir con la cortina.

- HIDROELECTRICA

Es de tipo exterior y se ubica en la margen izquierda. En una estructura de concreto armado se integran la obra de toma, la conducción, la casa de máquinas y los desfuegos.

La obra de toma consiste en un canal de llamada y cuatro tomas independientes. Está diseñada con 8 rejillas semicirculares. La conducción a presión consta de 8 conductores de 9x12 m y longitud de 40 m, con inclinación a 45° (Fig.3.31).

La casa de máquinas es de tipo exterior, tiene dimensiones de 165 m de longitud, 23.7 m de ancho y 60 m de altura.

Se instalaron cuatro turbinas Kaplan de eje vertical que operan con un gasto máximo de 360 m³/s, cada una, con capacidad de 105 MW; la carga de diseño es de 32 m. La subestación elevadora está alojada en una plataforma contigua a la planta hidroeléctrica.

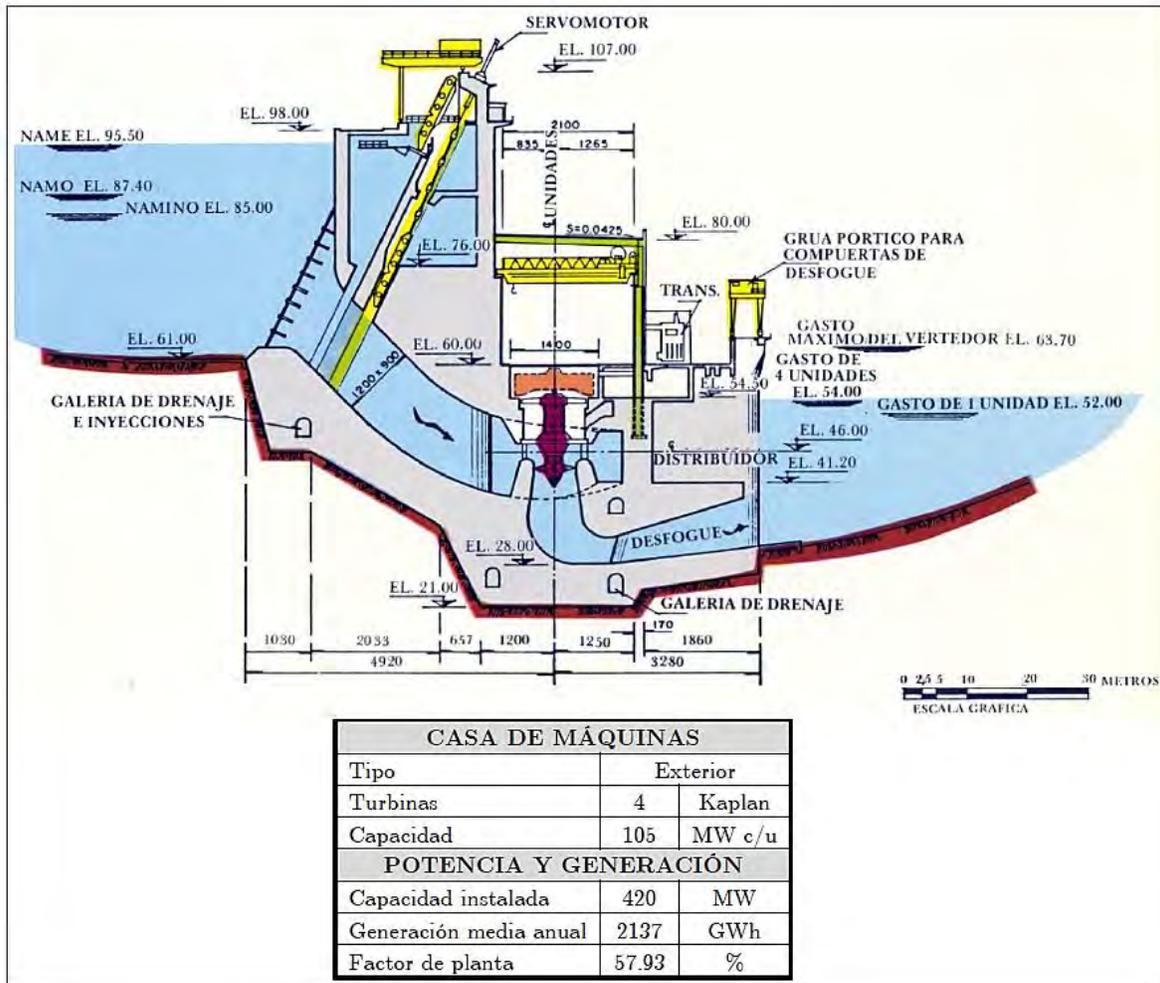


Fig.3.31. Planta hidroeléctrica de la presa Peñitas (Tomada de Ramírez, S., 2011).

3.4.3 Geología Local

Peñitas se ubica en el flanco norte de la Sierra de Chiapas, donde las formaciones que afloran son principalmente lutitas y areniscas del terciario, cubiertas en algunas zonas por suelos residuales y depósitos aluviales del cuaternario. Estas formaciones comprenden plegamientos con orientación NW-SE.

Estratigráficamente las formaciones más antiguas se encuentran próximas a la Sierra de Chiapas y las más recientes afloran hacia el golfo de México, constituyendo una estructura homoclinal con plegamientos locales.

Las corrientes fluviales de la zona forman una red hidrográfica de tipo dendrítico, en la que la corriente principal es el río Grijalva y su afluente mayor el Sayula.

La boquilla se localiza en el borde de la provincia fisiográfica Planicie Costera del Golfo.

Existen dos estructuras geológicas principales: el sinclinal de Maspac, cuyo eje pasa muy cerca del sitio de la boquilla (Fig.3.31) y el anticlinal Mono Pelado, con rumbo sensiblemente paralelo a la estructura anterior y longitud aproximada a 15 km. En la región existen además otras estructuras secundarias formando plegamientos (Fig. 3.32).

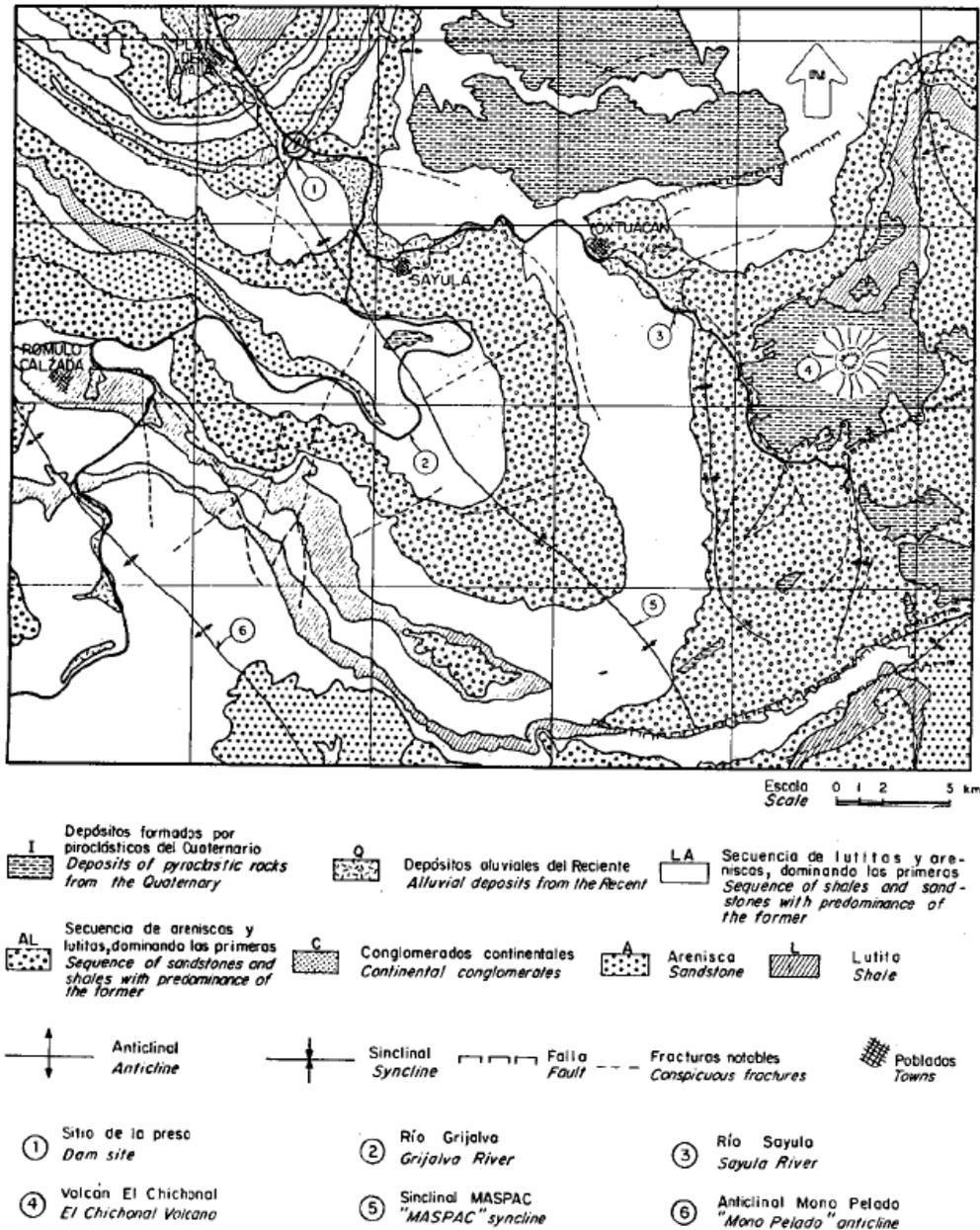


Fig. 3.32. Geología de Peñitas, (Tomada de Comportamiento de presas construidas en México, 1985).

A una distancia aproximada de 20 km al sureste de la boquilla se localiza el volcán activo El Chichonal, cuya más reciente erupción ocurrió en marzo de 1982, afectando la zona de Peñitas con lluvia de arena y un volumen moderado de arena transportada por el río.

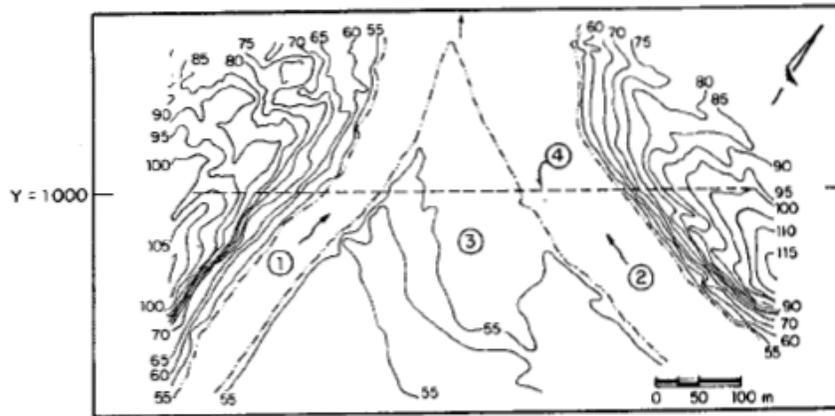
El aparato volcánico es un cono cinerítico constituido por materiales ácidos principalmente.

En ambos márgenes de la boquilla afloran areniscas de grano grueso, en algunos sitios conglomeráticas, con intercalaciones de lutita, sobre todo en la proximidad del contacto con las lutitas que las subyacen (Fig. 3.33). En casi toda la zona las areniscas están cubiertas por arcillas residuales lateríticas de poco espesor. En la boquilla el río está dividido en dos brazos que bordean un amplio playón triangular de materiales aluviales (Fig. 3.33a). Las partes más altas tienen la cota 150, o sea, 100 m sobre el nivel del río. Las laderas constituyen un acantilado que se formó 200 m aguas arriba de la boquilla y originado por erosión diferencial de la roca. En general, los estratos de esta roca en la boquilla tienen rumbo NE con echados de 6° a 10° hacia el NW, o sea, de margen derecha a margen izquierda.

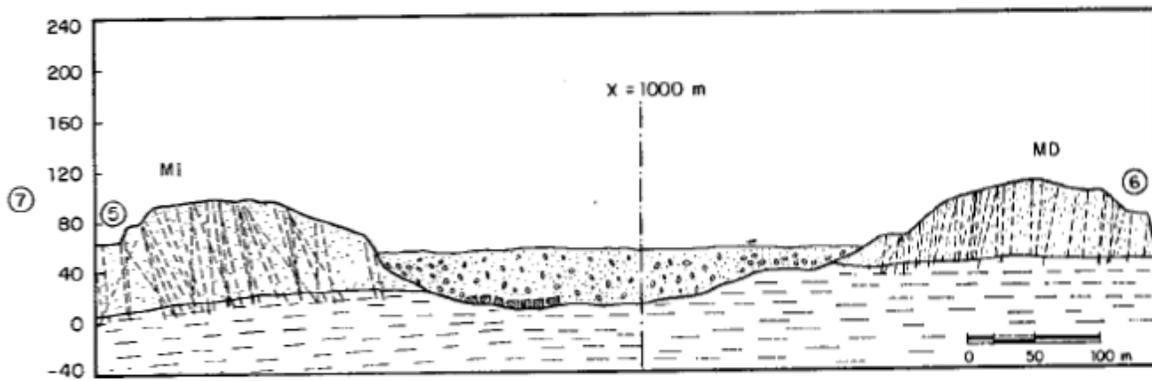
En la boquilla se observan tres sistemas de fracturas:

- a) El sistema α con rumbo N-S; es paralelo al cantil de la margen izquierda y tiene relación con el origen de ese escarpo.
- b) El sistema β con rumbo E-W; es paralelo al cantil de la margen derecha y está también relacionado con su origen.
- c) El sistema γ con dirección NW-SE, que dio origen a la ruta del cauce del río. Esta es la familia menos frecuente.

Las dos primeras familias constituyen un grupo de fallas transcurrentes, por lo que son esencialmente verticales. La tercera familia tiene inclinaciones que varían de 70° NW a 70° SE; estas fracturas son de extensión y paralelas a la dirección del esfuerzo principal máximo de compresión.



a) Vista en planta
Plan view



b) Geología del sitio de la presa
Geology of the damsite

- | | | |
|---|--|--|
| ① Río Grijalva (rama izquierda)
Grijalva River (left branch) | ⑥ Excavación para el vertedor
Excavation for the spillway | Fracturas
Fractures |
| ② Río Grijalva (rama derecha)
Grijalva River (right branch) | ⑦ Elevación, en m s. n. m.
Elevation, in m | Lutita
Shale |
| ③ Isla
Island | MI Margen izquierda
Left bank | Arenisca con intercalaciones de lutita
Sandstone interbedded with shale |
| ④ Eje de la presa
Dam axis | MD Margen derecha
Right bank | Grandes bloques volcánicos (~1m φ)
Large volcanic blocks (~1m φ) |
| ⑤ Excavación para casa de máquinas
Excavation for the powerhouse | Curvas de nivel, en m
Contours, in m | Aluvión
Alluvium |

Fig. 3.33. Vista en planta del sitio de la presa y perfil geológico por los ejes de casa de máquinas, cortina y vertedor, (Tomada de Comportamiento de presas construidas en México, 1985).

Sobre el eje de la cortina se realizó un sondeo SPE-2 el cual revela un perfil estratigráfico típico (Fig. 3.34), el aluvión de esa zona está constituido por arenas finas a medias con bajo contenido de limo y lentes de grava con boleos de hasta 30 cm de diámetro. Como se observa en la Figura 3.32 (b), a lo largo del eje de la cortina el perfil de la roca es más o menos regular y el aluvión alcanza una profundidad máxima de 55 m; cerca del contacto

aluvión-roca se encontró un depósito de grandes bloques volcánicos de hasta 1 m de diámetro, como se muestra en la misma figura.

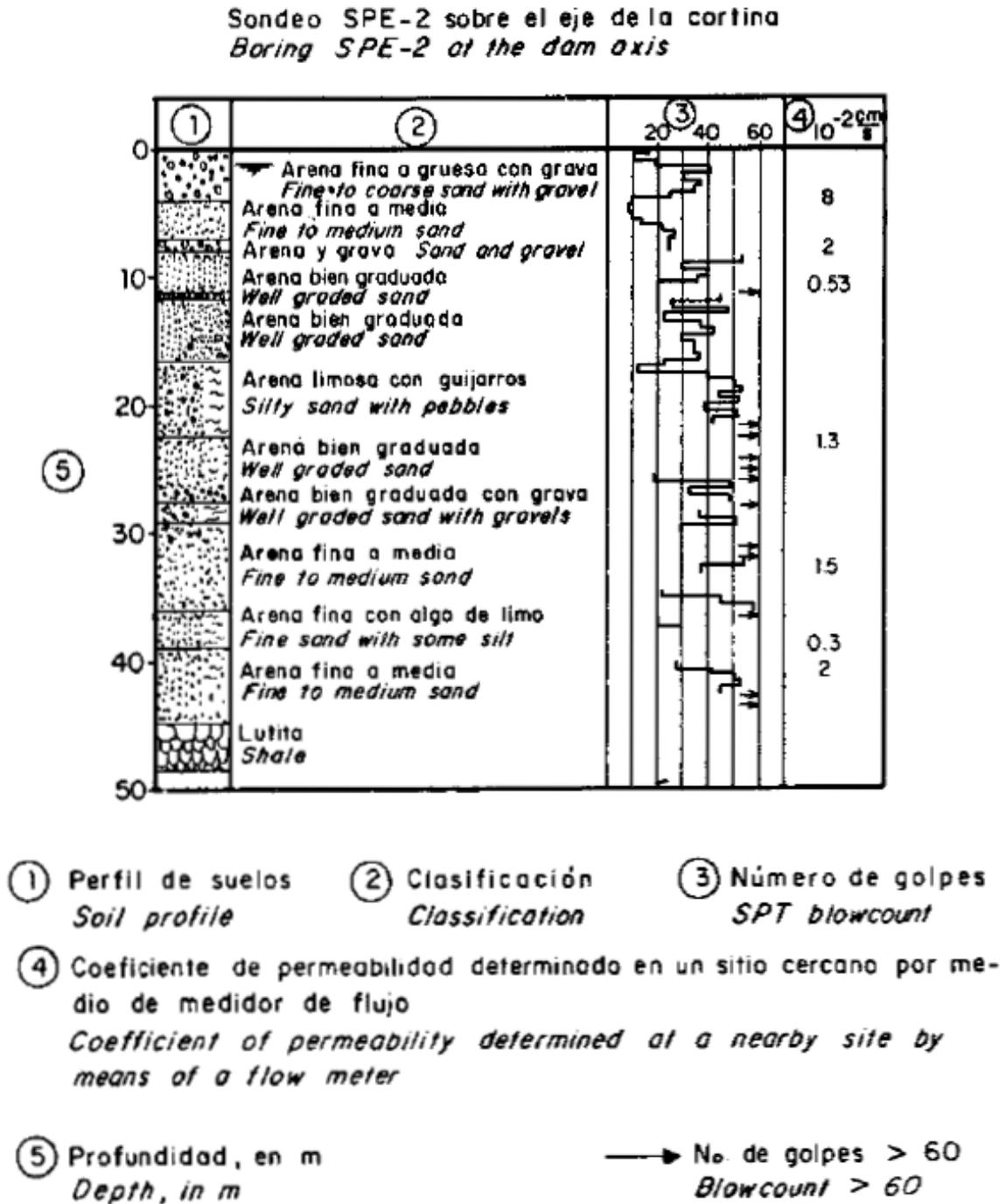


Fig. 3.34. Perfil de suelos típicos del aluvión, resistencia a la penetración estándar y resultados de pruebas de permeabilidad, (Tomada de Comportamiento de presas construidas en México, 1985).

CAPÍTULO 4. RESPUESTA DE LAS PRESAS ANTE EL SÍSMO

Antes de comentar la respuesta sísmica que presentaron las presas sobre el río Grijalva, es necesario definir algunos conceptos que ayuden a entender cómo su respuesta ante sismos; tomando como base el registro de acelerogramas.

4.1 ESPECTRO DE RESPUESTA

El espectro de respuesta describe la respuesta máxima de un sistema de un solo grado de libertad (SDOF, es el tipo más simple de sismógrafo, se puede ilustrar con un amortiguador de masa simple de un solo grado de libertad) a un movimiento de entrada particular en función de la frecuencia natural (o período natural) y la relación de amortiguamiento del sistema (Kramer, S, 1996).

Estos espectros pueden trazarse individualmente en escala aritmética o pueden combinarse, en virtud de las relaciones en la ecuación 4.1, en diagramas tripartitos, (Fig. 4.1).

$$\lambda_n = \int_0^{\omega_N} \omega^n G(\omega) d\omega \dots\dots\dots \text{ecuación 4.1}$$

Donde

$\omega^n: \frac{\pi}{\Delta t}$ es la frecuencia de Nyquist (la frecuencia más alta en la serie de Fourier).

$G(\omega)$: densidad espectral de potencia

El gráfico tripartito muestra la velocidad espectral en el eje vertical, la frecuencia (o período) natural en el eje horizontal y la aceleración y el desplazamiento en los ejes inclinados.

Las formas espectrales de respuesta típicas indican que los valores máximos de aceleración espectral, velocidad y desplazamiento están asociados con diferentes frecuencias (o períodos).

Debido a este comportamiento, los espectros de respuesta a menudo se dividen en porciones controladas por aceleración (alta frecuencia), controladas por velocidad (frecuencia intermedia) y controladas por desplazamiento (baja frecuencia).

Los espectros de respuesta elástica suponen un comportamiento de desplazamiento de fuerza estructural lineal. Sin embargo, para muchas estructuras reales, el comportamiento inelástico puede ser inducido por movimientos de tierra por terremotos.

Los espectros de respuesta reflejan fuertes características de movimiento del terreno indirectamente, ya que son "filtrados" por la respuesta de una estructura SDOF. La amplitud, el contenido de frecuencia y, en menor medida, la duración del movimiento de entrada influyen en los valores espectrales.

Es importante recordar que los espectros de respuesta representan solo las respuestas máximas de varias estructuras diferentes. Sin embargo, la respuesta de las estructuras es de gran importancia en la ingeniería sísmica, y el espectro de respuesta ha demostrado ser una herramienta importante y útil para la caracterización de un fuerte movimiento del suelo.

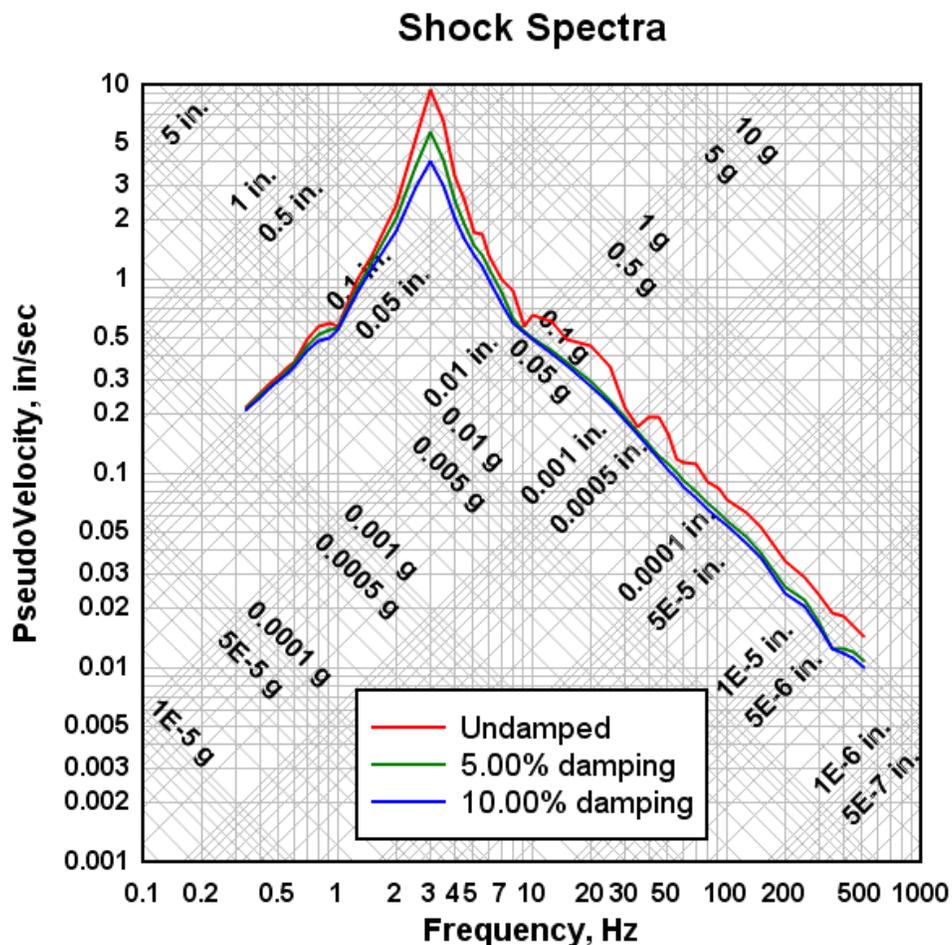


Fig. 4.1. Ejemplo de diagrama tripartito, (tomada de <https://www.dplot.com/tripartite.htm>, 2020).

4.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

La función de transferencia $H(\omega)$ de un sistema en un estado estable, con características dinámicas es la respuesta del sistema a la entrada de una vibración, midiendo de manera aproximada la respuesta transitoria inicial y final para la alteración del mismo, en cualquier instante, hasta alcanzar nuevamente su equilibrio estático. Usualmente para considerar el resultado de la entrada de una vibración corta y cerrada en un sistema (teóricamente cero) en un intervalo de tiempo, la función de transferencia se elimina. Podemos representar la función de vibración mediante la siguiente función:

$$x(t) = I\delta(t) \dots \dots \dots \text{ecuación 4.2}$$

Donde I es una constante con parámetros constantes con la dimensión (x) por (tiempo). Para el caso cuando $x(t)$ representa una fuerza de vibración o impulso con una magnitud.

La terminología anterior cubre el caso general cuando $x(t)$ representa algún parámetro de entrada, sea una fuerza o no, y define la función de transferencia del sistema respondiendo a la entrada de un impulso de manera que I tiene las dimensiones correctas. La excitación es una unidad de impulso cuando I es una unidad numérica. De tal manera que en respuesta a un impulso de entrada a un sistema inicialmente se encuentra inactivo y repentinamente sufre una alteración que lo hace vibrar o moverse, hasta que gradualmente recobra su estado de equilibrio estático durante un periodo de tiempo. La respuesta a la unidad de impulso cuando $t=0$ está representada por la función de transferencia $h(t)$ Fig. 4.2, Haciendo notar que cuando $h(t)=0$ para $t<0$ entonces $y(t)=0$ es decir antes de que ocurra la vibración o el impulso.

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(t) dt = I \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = I$$

en (Fuerza) por (Tiempo)

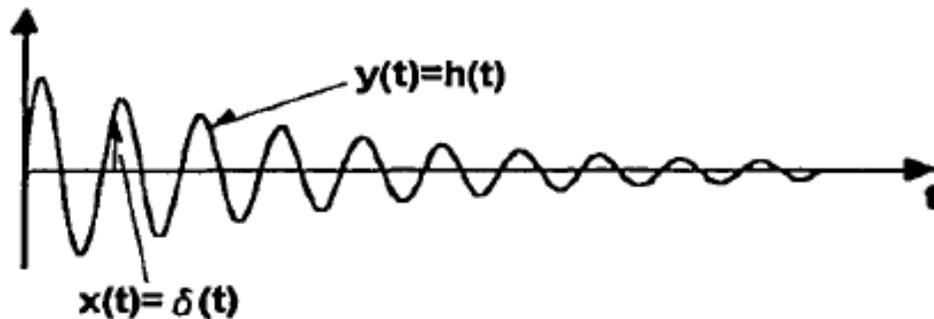


Fig. 4.2. Función de Transferencia, (Tomada de Martinez, M., 2002).

4.3 COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LAS PRESAS

Como bien se sabe los suelos presentan diferentes características que los distinguen en presentar diferentes efectos de amplificación o de atenuación sísmica.

Las ondas sísmicas viajan a través de los materiales, por lo que la amplificación de estas dependerá de la rigidez de cada material, provocando que la onda tenga una mayor amplitud y una menor velocidad o viceversa.

Para analizar el comportamiento de estas ondas en las presas se utilizará el programa DEGTRA con el cual se obtendrán las funciones de transferencia. Este programa se alimenta con los archivos de los registros de aceleraciones correspondientes al evento sísmico de cada presa.

Para obtener estas funciones de transferencia, así como su espectro de respuesta deben seguirse los siguientes pasos:

- Contar con el archivo del registro del sismo en un formato estándar.
- En el programa DEGTRA se encontrará un menú en el cual debemos seleccionar la opción de leer acelerograma, este nos abrirá una pantalla emergente en la cual debemos seleccionar el archivo del sismo a analizar.
- Una vez seleccionado, se abrirá una nueva pantalla la cual muestra la información del archivo, dando posibilidad de modificar el tipo de archivo, factor de diezmado y el DT.
- Después de haber validado la información del archivo el programa nos arrojará la señal del registro seleccionado.
- Posteriormente en el menú del programa se tiene la opción “calcular espectro de respuesta” en el cual podrá obtener diferentes espectros de respuesta dependiendo de la variable de interés.

A continuación, se mostrarán las características de los registros del sismo del 7 de septiembre del 2017, sus acelerogramas, los espectros de Fourier y los espectros de respuesta para cada una de las presas.

A. Presa Malpaso

Archivo Malpaso Base Cortina, MALB1709.081

Nombre del archivo: MALB1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	15:19:27
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Malpaso Base Cortina	
Localización de la estación:		Cortina de la presa Malpaso. Río Grijalva, Chiapas.	

Coordenadas de la estación:	17.167 LAT. N	93.600 LON. W
Altitud (msnm):	192	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina (tierra y enrocamiento).	
DATOS DEL SISMO		
Fecha del sismo (GMT):	08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):	04:49:18	
Magnitud (ES):	8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W
Profundidad focal (km):	58	
Unidad de los datos:	Gal (cm/s/s)	

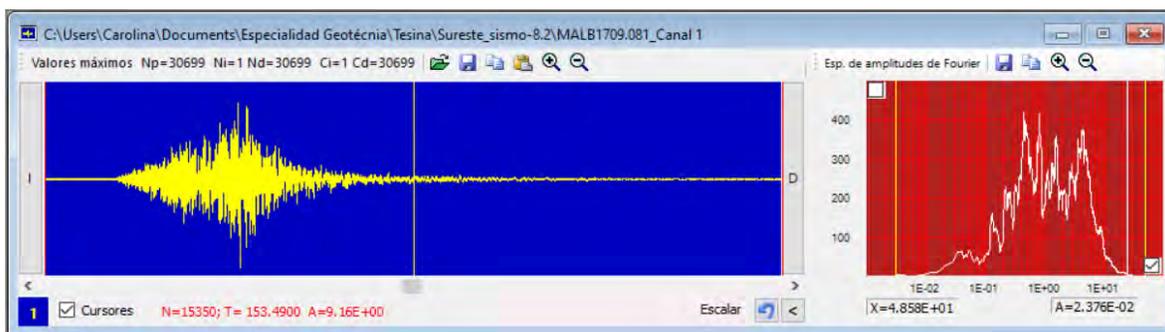


Fig. 4.3. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo MALB1709.081



Fig. 4.4. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo MALB1709.081

Archivo Malpaso Corona Centro, MALC1709.081

Nombre del archivo: MALC1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	15:19:26
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Malpaso Corona Centro	
Localización de la estación:		Cortina de la presa Malpaso. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	17.167 LAT. N	93.600 LON. W	
Altitud (msnm):		192	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina (tierra y enrocamiento).		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

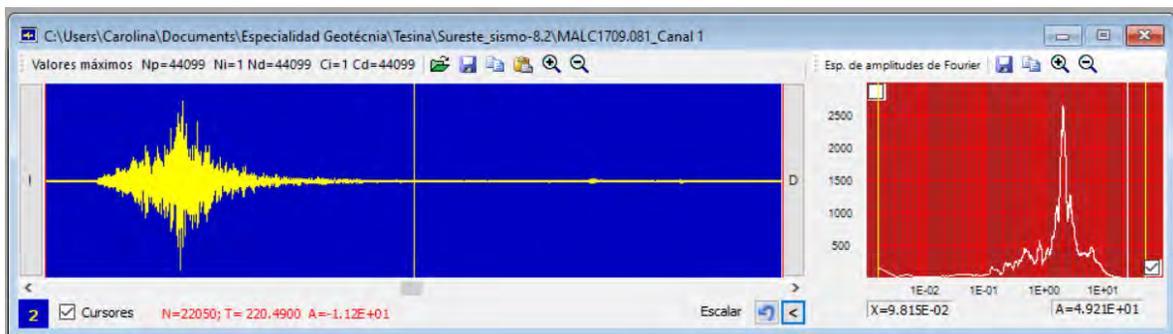


Fig. 4.5. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo MALC1709.081



Fig. 4.6. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo MALB1709.081

B. Presa La Angostura

Archivo La Angostura Base Cortina, ANGB1709.081

Nombre del archivo: ANGB1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	14:56:36
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Angostura base cortina	
Localización de la estación:		Presa la Angostura. Río Grijalva, Chiapas	
Coordenadas de la estación:	16.383 LAT. N	92.780 LON. W	
Altitud (msnm):		440	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina, en material grava-arena compactada.		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

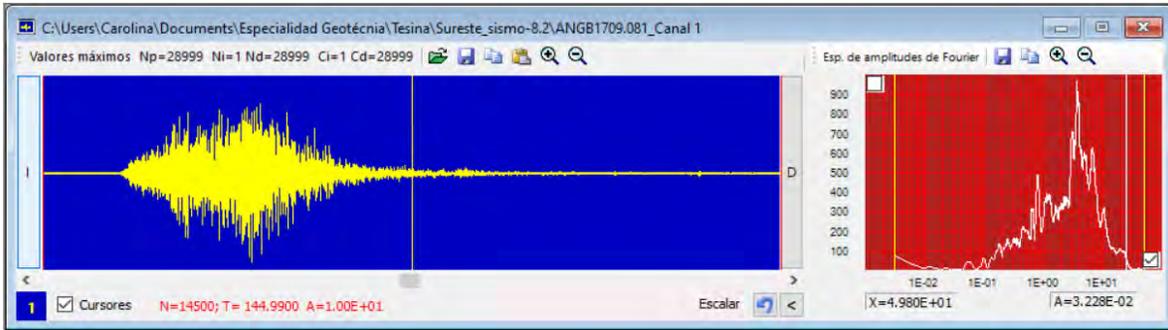


Fig. 4.7. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo ANGB1709.081



Fig. 4.8. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo ANGB1709.081

Archivo La Angostura Margen Derecha, ANGD1709.081

Nombre del archivo: ANGD1709.081			
Fecha de creación	26/Nov/2017	Hora de creación:	17:30:32
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Angostura Margen Derecha	
Localización de la estación:		Sobre el apoyo de la cortina de la presa La Angostura. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	16.383 LAT. N	92.780 LON. W	
Altitud (msnm):		543	
Tipo de suelo:	Caliza Arcillosa		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

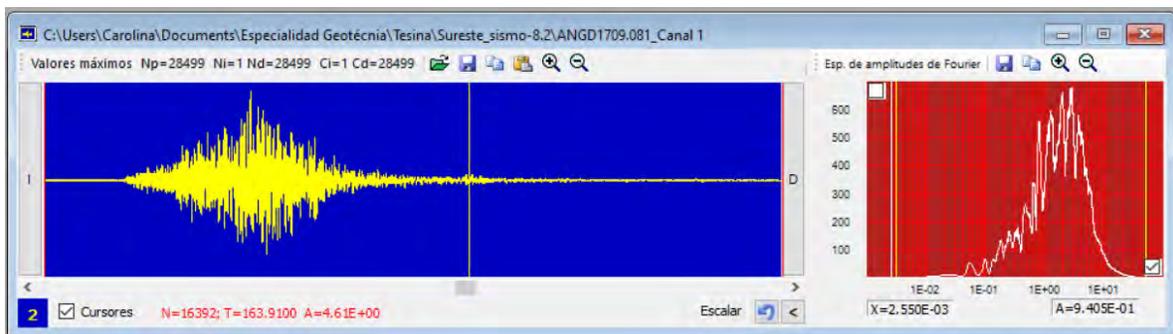


Fig. 4.9. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo ANGD1709.081



Fig. 4.10. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo MALB1709.081

Archivo La Angostura Media Cortina, ANGM1709.081

Nombre del archivo: ANGM1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	Hora de creación:	15:06:45
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Angostura Media Cortina	
Localización de la estación:		Presa la Angostura. Rio Grijalva, Chiapas	
Coordenadas de la estación:	16.383 LAT. N	92.780 LON. W	
Altitud (msnm):		440	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina, en material grava-arena compacta		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		09 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

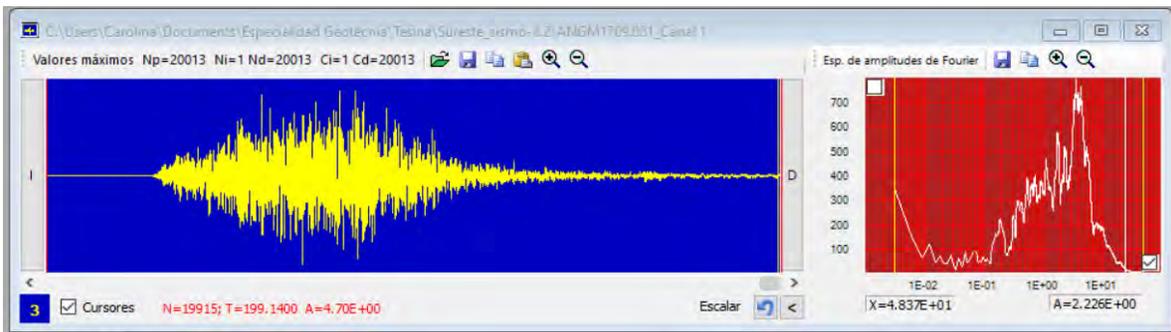


Fig. 4.11. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo ANGM1709.081

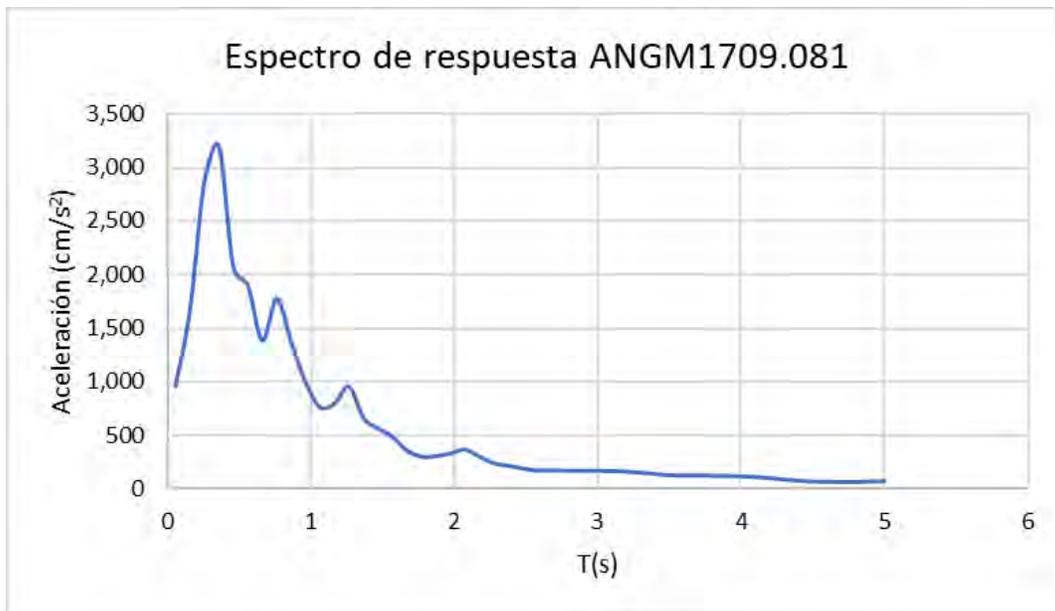


Fig. 4.12. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo MALB1709.081

C. Presa Chicoasén

Archivo Chicoasén Base Cortina, CHIB1709.081

Nombre del archivo: CHIB1709.081			
Fecha de creación	26/Nov/2017	hora de creación:	16:56:21
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Chicoasén base cortina	
Localización de la estación:		Cortina de la presa Chicoasén. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	16.933 LAT. N	93.100 LON. W	
Altitud (msnm):		229	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina (enrocamiento a volteo).		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

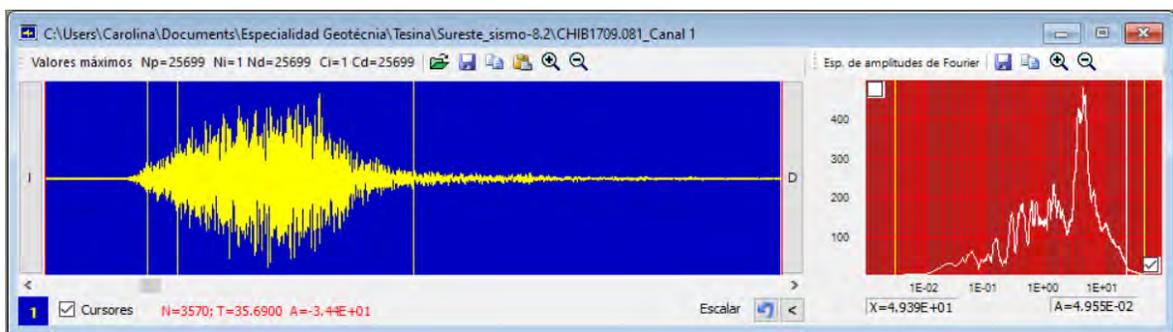


Fig. 4.13. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo CHIB1709.081

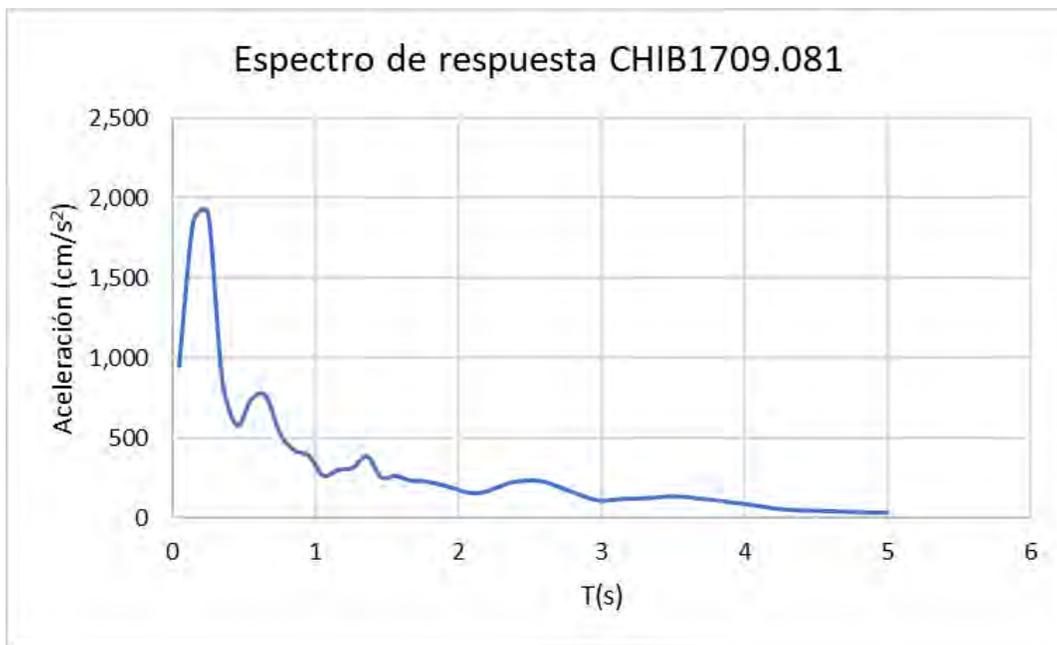


Fig. 4.14. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo CHIB1709.081

Archivo Chicoasén Corona Centro, CHIC1709.081

Nombre del archivo: CHIC1709.081			
Fecha de creación	26/Nov/2017	Hora de creación:	16:56:22
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Chicoasén Corona Centro	
Localización de la estación:		Corona de la cortina de la presa Chicoasén. Rio Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	16.933 LAT. N	93.100 LON. W	
Altitud (msnm):		402	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina, en el contacto entre el núcleo impermeable de arcilla y enrocamiento compactado		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

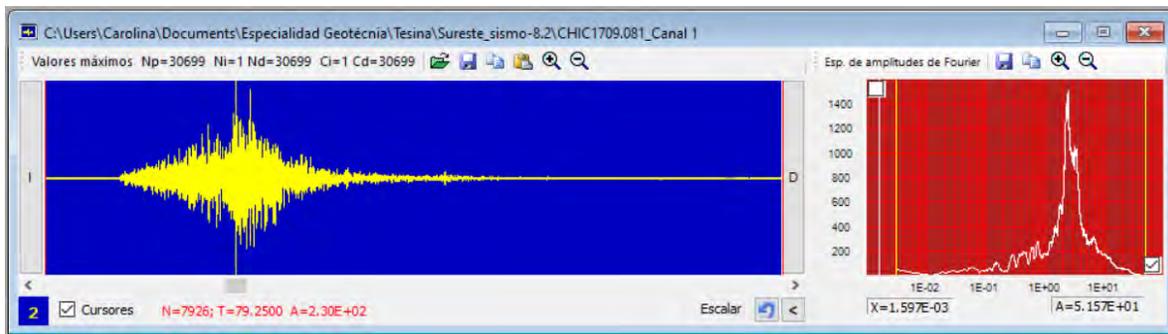


Fig. 4.15. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo CHIC1709.081

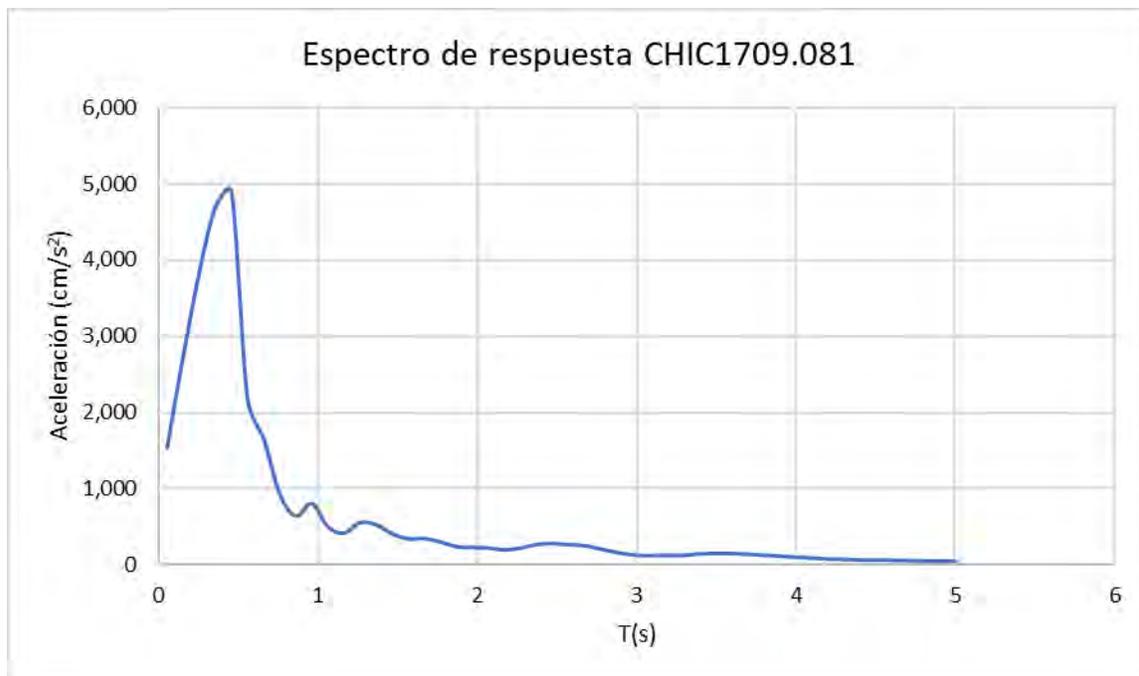


Fig. 4.16. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo CHIC1709.081

Archivo Chicoasén Margen Derecha, CHID1709.081

Nombre del archivo: CHID1709.081			
Fecha de creación	26/Nov/2017	Hora de creación:	16:56:23
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Chicoasén Margen Derecha	
Localización de la estación:		Sobre el apoyo de la cortina de la presa Chicoasén. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	16.933 LAT. N	93.100 LON. W	
Altitud (msnm):		229	
Tipo de suelo:	Lutitas		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		09 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

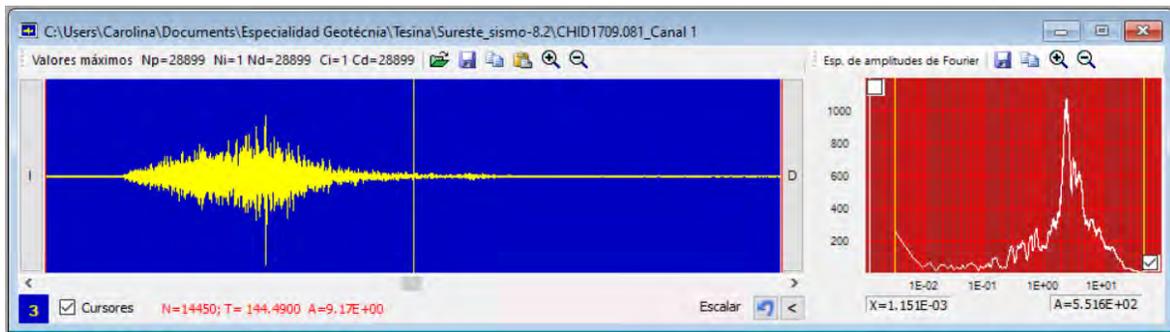


Fig. 4.17. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo CHID1709.081



Fig. 4.18. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo CHID1709.081

Archivo Chicoasén Margen Izquierda, CHII1709.081

Nombre del archivo: CHII1709.082			
Fecha de creación	07/Dic/2017	Hora de creación:	14:02:07
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Chicoasén Margen Izquierda	
Localización de la estación:		Sobre el apoyo de la cortina de la presa Chicoasén. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	16.933 LAT. N	93.100 LON. W	
Altitud (msnm):		229	
Tipo de suelo:	Calizas interestratificadas con lutitas		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

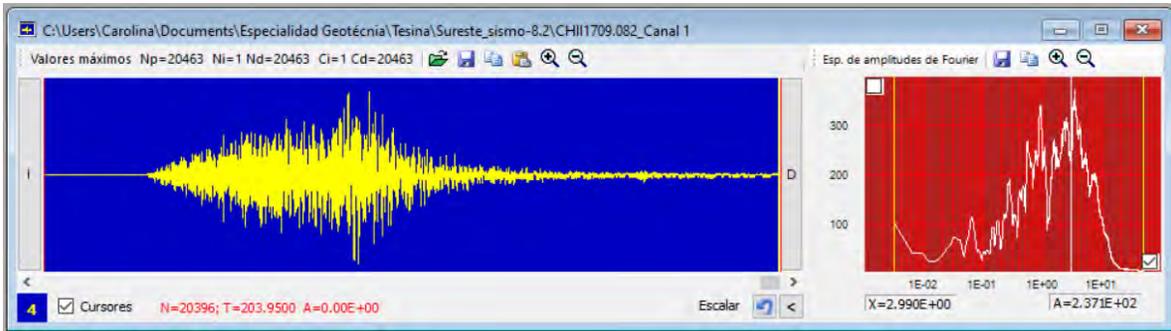


Fig. 4.18. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo CHII1709.081



Fig. 4.20. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo CHII1709.081

D. Presa Peñitas

Archivo Peñitas Base Cortina, PENB1709.081

Nombre del archivo: PENB1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	14:38:04
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Peñitas Base Cortina	
Localización de la estación:		Cortina de la presa Peñitas. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	17.433 LAT. N	93.450 LON. W	
Altitud (msnm):		65	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina (enrocamiento compactado).		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

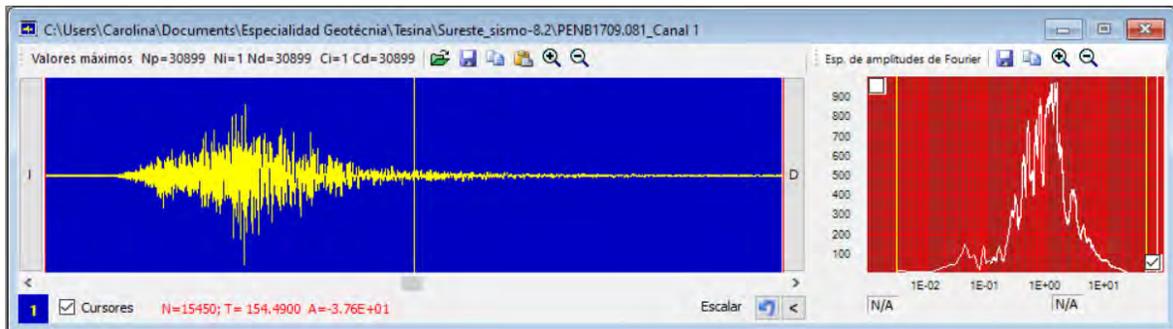


Fig. 4.21. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo PENB1709.081



Fig. 4.22. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo PENB1709.081

Archivo Peñitas Corona Centro, PENC1709.081

Nombre del archivo: PENC1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	14:38:05
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Peñitas Corona Centro	
Localización de la estación:		Cortina de la presa Peñitas. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	17.433 LAT. N	93.450 LON. W	
Altitud (msnm):		98	
Tipo de suelo:	Sobre el cuerpo de la cortina en el contacto entre el núcleo de arcilla y enrocamiento.		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

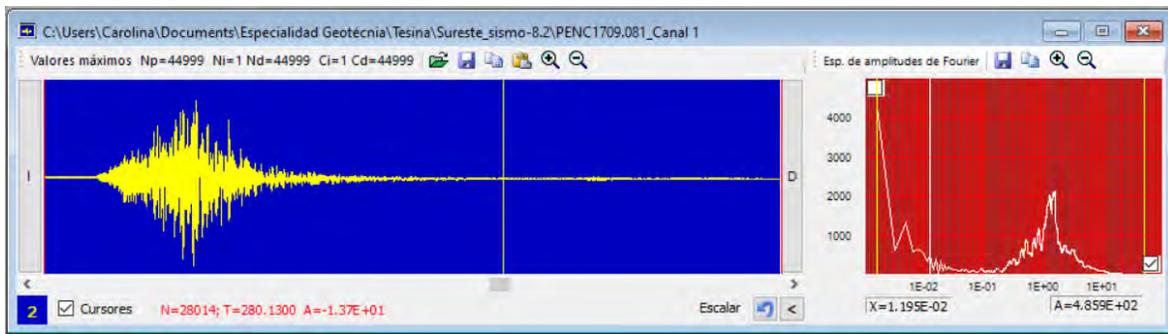


Fig. 4.23. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo PENC1709.081

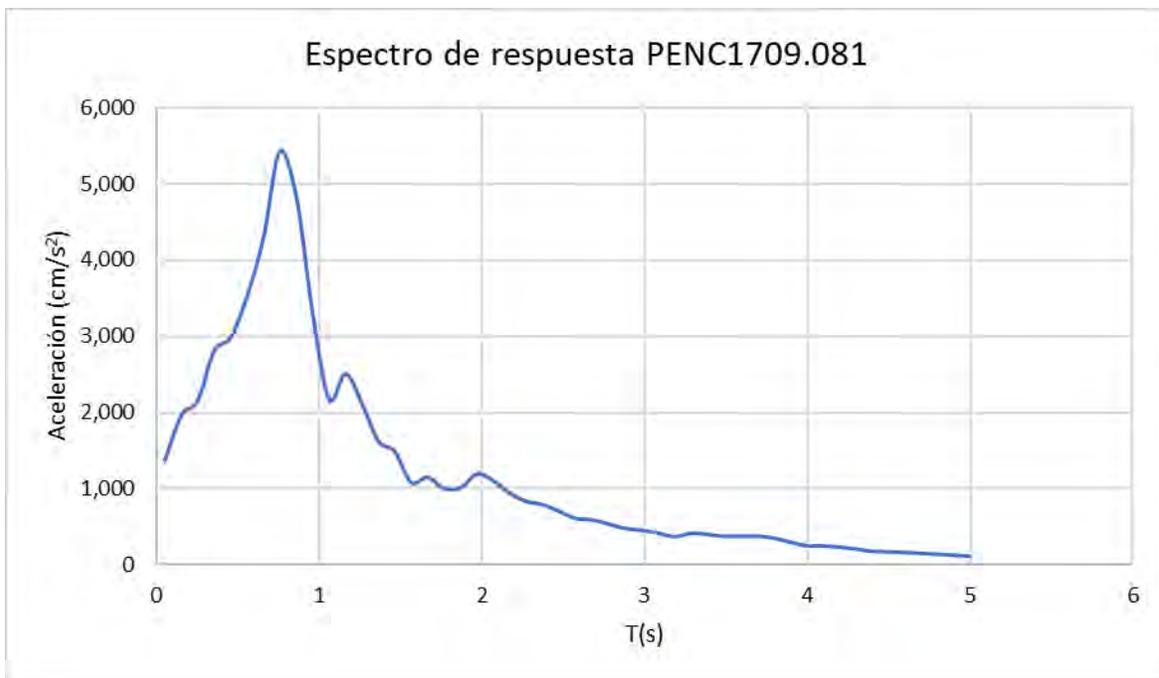


Fig. 4.24. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo PENC1709.081

Archivo Peñitas Margen Derecha, PEND1709.081

Nombre del archivo: PEND1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	14:38:06
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Peñitas Margen Derecha	
Localización de la estación:		Sobre el apoyo de la cortina de la presa Peñitas. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	17.433 LAT. N	93.450 LON. W	
Altitud (msnm):		98	
Tipo de suelo:	Areniscas con intercalaciones de lutitas.		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

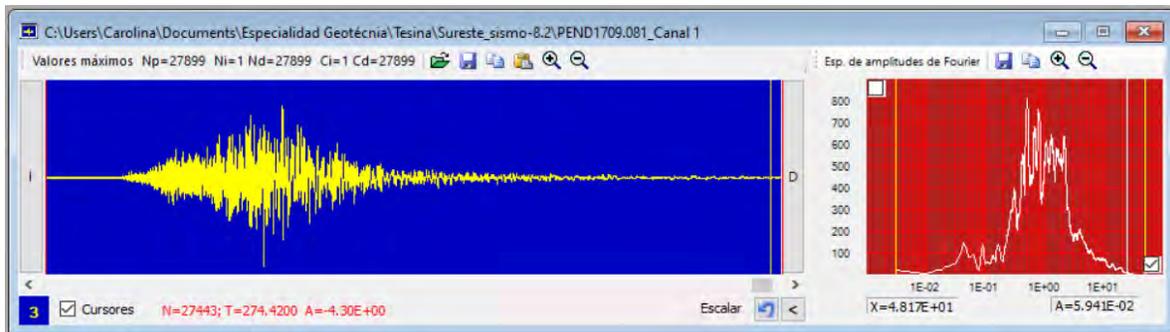


Fig. 4.25. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo PEND1709.081



Fig. 4.26. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo PEND1709.081

Archivo Peñitas Subestación, PENT1709.081

Nombre del archivo: PENT1709.081			
Fecha de creación	07/Dic/2017	hora de creación:	14:24:00
DATOS DE LA ESTACIÓN			
Nombre de la estación:		Peñitas Subestación	
Localización de la estación:		Presa Peñitas. Río Grijalva, Chiapas.	
Coordenadas de la estación:	17.433 LAT. N	93.450 LON. W	
Altitud (msnm):		94	
Tipo de suelo:	Areniscas con intercalaciones de lutitas.		
DATOS DEL SISMO			
Fecha del sismo (GMT):		08 de septiembre de 2017	
Hora epicentro (GMT):		04:49:18	
Magnitud (ES):		8.2	
Coordenadas del epicentro:	14.85 Lat. N	94.11 Long. W	
Profundidad focal (km):		58	
Unidad de los datos:		Gal (cm/s/s)	

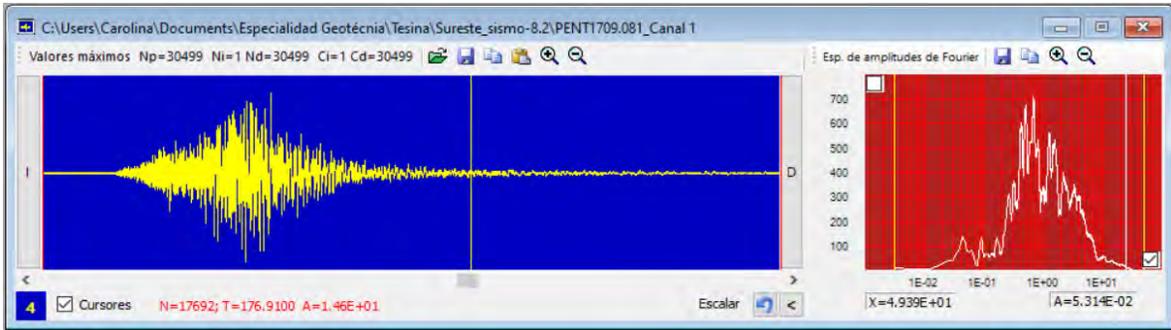


Fig. 4.27. Cálculo del espectro de Fourier con el software DEGTRA para el archivo del sismo PENT1709.081



Fig. 4.28. Espectro de respuesta de aceleración para el archivo del sismo PENT1709.081

4.4 RESULTADOS

Para conocer el comportamiento de cada una presa ante el sismo del 07 de septiembre de 2017, en particular su modo de vibrar, se utilizaron los registros del evento sísmico recuperados de las estaciones acelerográficas de cada presa.

En el apartado anterior fueron mostrados los espectros de respuesta, que, dicho sea de paso, muestran distintas formas vibrar debido a las características de cada una de las presas, a la ubicación de la estación en cada presa, a la distancia epicentral y a las condiciones de sitio locales.

A continuación, son comparado los espectros de respuestas obtenidos respecto a la posición de cada estación.

Adicionalmente, con ayuda del programa DEGTRA se analizaron los eventos sísmicos y se obtuvieron las funciones de transferencia entre:

- Base Cortina
- Corona centro
- Margen derecha

Para la Base Cortina se obtuvieron los espectros de respuesta de las 4 presas ubicadas sobre el río Grijalva, obteniendo el siguiente comportamiento (Fig. 4.29):



Fig. 4.29. Espectros de respuesta sobre la base de la cortina de las cuatro presas

Como se puede observar en la Figura 4.29 los espectros de respuesta de la base de la cortina presentan aceleraciones máximas de 4500 cm/s^2 y 1900 cm/s^2 .

Este cambio de aceleraciones se debe al tipo de material que se tiene ubicado en cada sitio, a continuación, se analizarán las presas respecto a la geología del sitio:

- Presa Angostura que es la que presenta la aceleración máxima podemos observar que en la base de la cortina está constituida por formaciones sedimentarias estratificadas compuesta de calizas y lutitas, principalmente se tienen calizas arcillosas cubiertas por formaciones arrésciales y lutitas.
- Presa Peñitas, con aceleración máxima de 3000 cm/s^2 aproximadamente, compuesta en la base principalmente por aluvión con un espesor de 55 cm aproximadamente el cual está constituido por arenas finas a medias con bajo contenido de limo y lentes de grava con boleos de hasta 30 cm de diámetro, en el contacto con la roca se encuentra un depósito de grandes bloques volcánicos de hasta 1 m de diámetro.
- Presa Malpaso, con aceleración aproximadamente de 2000 cm/s^2 , la base está constituida por el conglomerado Malpaso el cual está constituido por bancos gruesos de conglomerados bien cementados, con matriz fina arenoarcillosa, dentro de esta roca se encuentran lentes de arenisca o lutitas, muy compactas con espesor de 6 m. el conglomerado está cortado por fallas tipo normal empacadas con material arcilloso.
- Presa Chicoasén, con aceleración aproximadamente de 1900 cm/s^2 , la base está constituida por depósitos aluviales con grandes boleos que subyacen a una unidad de calizas estratificadas de color gris oscuro, separadas por capas de arcillas carbonosas.

Como puede observarse en la descripción del material para cada presa, cuando se tiene un material suelto o con baja densidad las aceleraciones serán muy altas, sin embargo, al tener materiales cementados o rocosos las aceleraciones disminuyen drásticamente.

Para el análisis de Corona Centro, se obtuvieron información de tres presas, Malpaso, Peñitas y Chicoasén, su espectro de respuesta está dibujado en la Figura 4.30.

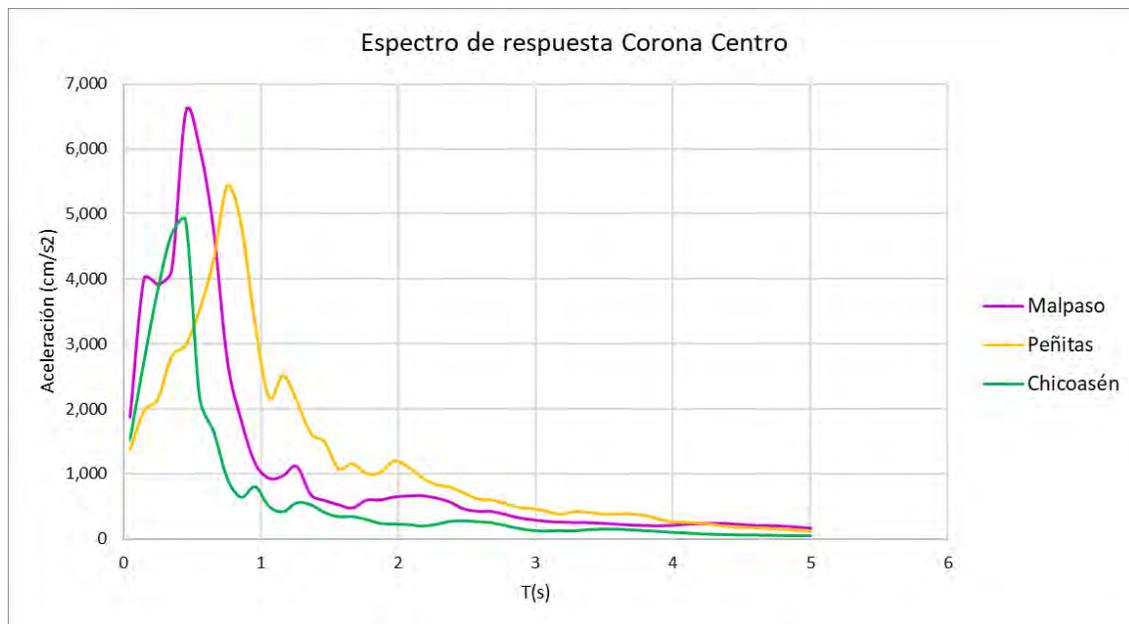


Fig. 4.30. Espectros de respuesta de tres presas en el centro de la corona de la cortina.

A continuación, se describe el material que constituye a cada una de las cortinas de las tres presas:

- Malpaso: cortina tipo tierra y enrocamiento, compuesta por un núcleo de arcillas de 667400 m³, con un filtro ubicado aguas abajo compuesto de arena y grava (117160 m³), el material de transición está compuesto de rezaga (328790 m³), posterior al material de transición se colocó material producto de excavaciones en roca (3622920 m³) y finalmente el enrocamiento selecto a volteo (338590 m³), dando un volumen total de la cortina aproximado a 5077280 m³.
- Peñitas: cortina tipo tierra y enrocamiento, se compone de con núcleo central de arcilla compactada (250000 m³), el filtro está compuesto de grava-arena procesada, la transición está compuesta de grava-arena limpia y el enrocamiento compactado.
- Chicoasén: cortina tipo tierra y enrocamiento, compuesta por un núcleo impermeable construido con arena arcillosa con alto contenido de grava, la fracción fina, las arcillas fueron de baja plasticidad. Los filtros compuestos de arena bien graduada, transiciones compuestas de gravas producto de trituración y cribado, los respaldos constituidos por masas de enrocamiento construidos con roca caliza de buena calidad.

Como puede apreciarse en la Figura 4.30, se presentan diferentes aceleraciones de los espectros de respuesta, aunque puede verse que presentan un comportamiento casi similar. Lo que hace que tengan diferentes aceleraciones es por la disposición de los materiales en la cortina, cabe mencionar que las tres cortinas de las presas son del tipo tierra y enrocamiento, sin embargo, infiere el proceso de colocación, compactación y el

volumen de material, la altura de la presa, la distribución de los materiales y la geometría de la presa.

El último análisis realizado para las presas fue Margen Derecha, para este se utilizó la información disponible de tres presas, Chicoasén, Angostura y Peñitas, en la siguiente Figura 4.31, se observan las aceleraciones de cada presa.



Fig. 4.31. Aceleración de la Margen derecha para tres presas.

A continuación, se describe el material existente en cada una de las márgenes derechas de las tres presas:

- Chicoasén: la margen derecha está compuesta por dos unidades geológicas, la unidad uno constituida por calizas estratificadas de espesores variables constituida por capas de arcilla y lutita, la unidad dos, ubicada bajo la unidad uno, está constituida por una caliza masiva sin estratificaciones de color blanco. Arriba de la unidad uno aflora un depósito aluvial con grandes boleos y una capa de lutitas que sobreyacen a la unidad uno en contacto con el depósito aluvial.
- Angostura: La margen derecha está compuesta por tres afloramientos, denominados por unidades, U-2 compuesto de caliza arcillosa, U-3 compuesto de caliza estratificada, siguiente afloramiento compuesto por dos unidades U-4 y U-5 constituido por caliza arcillosa y caliza estratificada en capas delgadas, respectivamente.
- Peñitas: compuesta por afloramientos de areniscas de grano grueso, en algunos sitios conglomeráticas, con intercalaciones de lutita, sobre la proximidad del

contacto con las lutitas que la subyacen. En casi toda la zona las areniscas están cubiertas por arcillas residuales lateríticas de poco espesor.

Como se puede observar para esta zona margen derecha nuevamente se tienen diferentes geologías que hacen que las aceleraciones de los espectros varíen.

Como último ejemplo y para representar mejor las aceleraciones de los eventos sísmicos en las diferentes presas, se realizó la comparación de dos estaciones de una misma presa, en este caso fue la presa Chicoasén, en la cual se comparan las aceleraciones de la margen izquierda y en la margen derecha (Fig. 4.32).

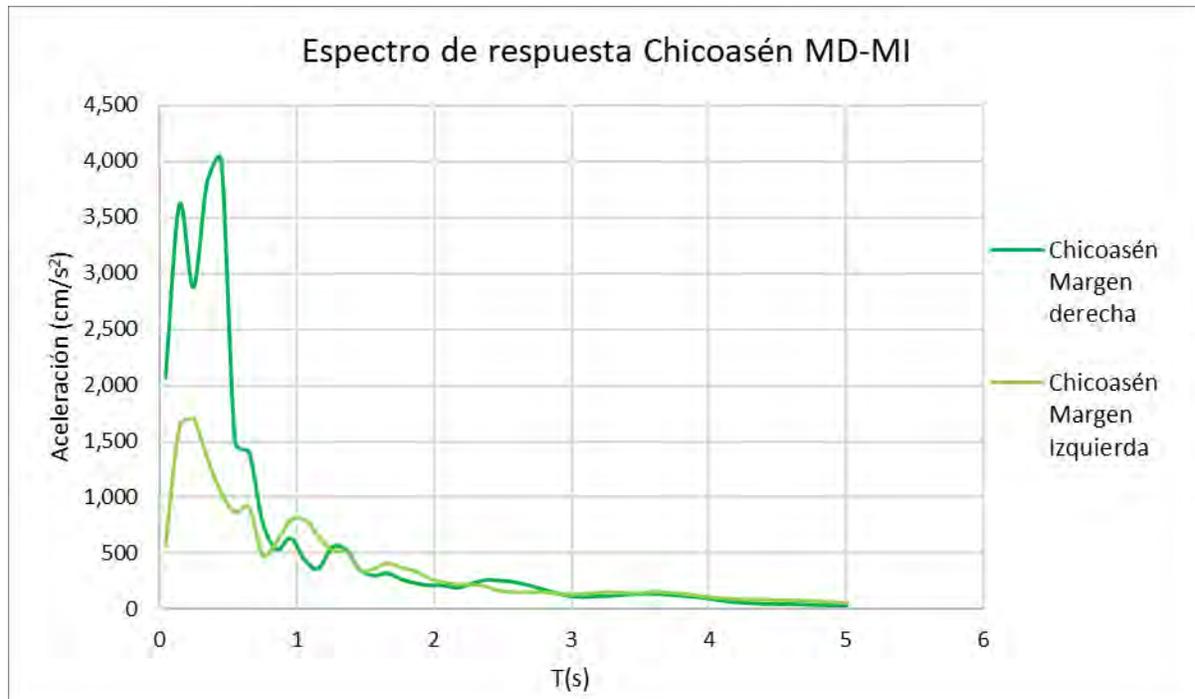


Fig. 4.32. Espectro de respuesta de la margen derecha y margen izquierda de la presa Chicoasén.

Cabe mencionar que es el mismo sitio, por lo cual deberían presentar la misma geología con mínimas diferencias. Como se mencionó anteriormente la margen derecha de la presa Chicoasén esta está compuesta por dos unidades geológicas, la unidad uno constituida por calizas estratificadas de espesores variables constituida por capas de arcilla y lutita, la unidad dos, ubicada bajo la unidad uno, está constituida por una caliza masiva sin estratificaciones de color blanco. Arriba de la unidad uno aflora un deposito aluvial con grandes boleos y una capa de lutitas que sobreyacen a la unidad uno en contacto con el deposito aluvial. Cabe mencionar que estas unidades presentan cierta inclinación por lo cual la unidad tres no es tan representativa. Sin embargo, en la margen izquierda se tienen las mismas unidades, unidad uno, unidad 2 y sobre la unidad uno la capa de lutitas, pero estas capas son casi horizontales y para esta margen la unidad tres es más representativa, esta unidad está compuesta de caliza interestratificada con lutita. Se puede apreciar la

disposición de las unidades geológicas en la Figura 3.22 presentada en el capítulo tres de este documento.

Finalmente, en la siguiente Tabla 4.1 comparativa se presenta un breve resumen de las características principales de las cuatro presas ubicadas sobre el río Grijalva.

Tabla 4.1. Tabla comparativa de las principales características de las presas estudiadas.

Características de las presas	Presa Malpaso "Netzahualcóyotl"	Presa La Angostura "Dr. Belisario Domínguez"	Presa Chicoasén	Presa Peñitas
Tipo de presa	Tierra y enrocamiento	Tierra y enrocamiento	Tierra y enrocamiento	Tierra y enrocamiento
Geometría	<p>Cortina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura máxima: 138 m • Elevación de la corona: 192 msnm • Ancho de la corona: 10 m • Longitud de la corona: 478 m • Volumen total de la cortina: $5.08 \times 10^6 \text{ m}^3$ • Taludes exteriores de 2:1 • Bordo libre: 5.40 m <p>Embalse</p> <ul style="list-style-type: none"> • NAME: 188 msnm • NAMO: 182.50 msnm • NAMINO: 144 msnm 	<p>Cortina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura máxima: 145 m • Elevación de la corona: 543 msnm • Ancho de la corona: 10 m • Longitud de la corona: 295 m • Volumen total de la cortina: $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ • Taludes exteriores de 2:1 y 1.8:1 aguas arriba y aguas abajo <p>Embalse</p> <ul style="list-style-type: none"> • NAME: 539 msnm • NAMO: 533 msnm • NAMINO: 500 msnm 	<p>Cortina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura máxima: 261 m (roca basal) y 202 m (fondo del río). • Elevación de la corona: 405 msnm • Ancho de la corona: 25 m • Longitud de la corona: 584 m • Volumen total de la cortina: $14.51 \times 10^6 \text{ m}^3$ • Taludes exteriores de 2.1:1 y 2:1 aguas arriba y aguas abajo <p>Embalse</p> <ul style="list-style-type: none"> • NAME: 395 msnm • NAMO: 388 msnm • NAMINO: 380 msnm 	<p>Cortina</p> <ul style="list-style-type: none"> • Altura máxima: 43 m • Elevación de la corona: 98 msnm • Ancho de la corona: 8 m • Longitud de la corona: 560 m • Volumen total de la cortina: $3.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ • Taludes exteriores de aguas arriba y aguas abajo <p>Embalse</p> <ul style="list-style-type: none"> • NAME: 93.50 msnm • NAMO: 87.40 msnm
Volumen de los materiales que conforman la cortina	<p>Excavación para desplante: $149,725 \text{ m}^3$</p> <p>Material Impermeable: $667,400 \text{ m}^3$</p> <p>Filtro de arena: $117,160 \text{ m}^3$</p> <p>Material de transición de rezaga: $328,790 \text{ m}^3$</p>	<p>Volumen total $4.0 \times 10^6 \text{ m}^3$</p> <p>Material utilizado: Suelo arcilloso compactado para el núcleo, grava y arena compactada, enrocamiento compactado, enrocamiento</p>	<p>Material utilizado: núcleo impermeable arcilla ($2.07 \times 10^6 \text{ m}^3$), filtros (arena bien graduada, $0.73 \times 10^6 \text{ m}^3$), zona de transición (roca-grava-arena $2.71 \times 10^6 \text{ m}^3$), enrocamiento compactado</p>	<p>Volumen total $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$</p> <p>Materiales utilizados: núcleo impermeable de arcilla $250,000 \text{ m}^3$, filtro (grava-arena procesada), transición (grava-arena limpia), enrocamiento compactado,</p>

	Material producto de excavaciones en roca: 362,2920 m ³ Enrocamiento selecto a volteo: 338,590 m ³ Volumen total de la cortina: 5,077,280 m ³	a volteo y enrocamiento de protección.	(bien graduado, roca caliza), enrocamiento uniforme, enrocamiento a volteo, enrocamiento seleccionado.	enrocamiento de desperdicio (respaldo adicional), enrocamiento a volteo, enrocamiento de protección de gran tamaño.
Estratigrafía	Calizas, lutitas, conglomerados, areniscas y aluviones recientes. Suelos residuales (lateríticos) con espesor de hasta 30 m.	Caliza pura o arcillosa, formaciones arrecifales y lutitas	Tres unidades: calizas interestratificadas con capas arcillosas (U-1 y U-3) y caliza masiva (U-2), cubiertas por lutita	Lutitas y areniscas del terciario, cubiertas en algunas zonas por suelos residuales y depósitos aluviales del cuaternario.
Sección representativa	Base cortina Corona centro -	Base cortina - Margen derecha Media cortina	Base cortina Corona centro Margen derecha Margen izquierda	Base cortina Corona centro Margen derecha
Suelos de cimentación	-	Se realizó un tapete de inyecciones y una pantalla de inyecciones.	-	Pantalla impermeable de concreto plástico de 55 m de profundidad máxima y 420 m de longitud.
Aceleraciones máximas medidas	2000 cm/s ² (base cortina) 6800 cm/s ² (corona centro)	4500 cm/s ² (base cortina) - 3200 cm/s ² (Margen derecha) 3200 cm/s ²	1900 cm/s ² (base cortina) 4900 cm/s ² (corona centro) 4000 cm/s ² (Margen derecha) 1700 cm/s ² (Margen izquierda)	3000 cm/s ² (base cortina) 5200 cm/s ² (corona centro) 2200 cm/s ² (Margen derecha)

CONCLUSIONES

Al realizar los espectros de Fourier para la zona de la base de la cortina, corona centro y margen derecha, podemos observar que las amplitudes para cada evento sísmico representan diferentes frecuencias, se observa que los espectros son muy similares, sin embargo, se puede observar que tienen diferentes comportamientos. Por ejemplo, algunos espectros alcanzan amplitudes muy grandes. Como se observó en el análisis esto depende mucho del material y de la geología del sitio.

Por ejemplo, en el espectro de Fourier de la presa de Chicoasén, a pesar que es el mismo sitio se observa que presentan diferentes amplitudes y distinto comportamiento.

Esto lo podemos constatar con el análisis de las funciones de transferencia, en las cuales se nota que las presas tienen diferentes modos de vibrar.

Como se observó en el capítulo 3 la geología de las presas es muy distinta a pesar que se encuentra sobre el mismo caudal. Esto es un factor importante por el cual se tienen los diferentes modos de vibrar en las presas.

Analizando una sola presa, Chicoasén margen derecha e izquierda, se observó que a pesar de contar con la misma geología de sitio al presentarse una variación en la inclinación de los estratos se obtuvieron distintas respuestas en las funciones de transferencia. De igual manera influyen las fallas geológicas que estén presentes, ya que estas pueden presentar relleno del mismo material que corta o relleno diferente.

Otro punto que se puede observar en los espectros de respuesta respecto a los resultados de la corona centro, es que al haber analizado tres de las cuatro presas obteniéndose que presentan diferentes formas de vibrar, a pesar de que son del mismo tipo de presa de tierra y enrocamiento, esto igual se debe los diferentes materiales que se coloca en la cortina. También las diferentes rigideces pueden deberse a la geometría de estas, debido a que pueden ser más flexibles unas que otras.

Como ejemplo de que los materiales y geología intervienen en la forma de vibrar de la estructura se puede apreciar en los espectros base cortina y corona centro, los de base cortina presentan aceleraciones menores respecto a los espectros de corona centro. Esto como debido a como se ha mencionado con anterioridad, en la corona centro se tienen materiales introducidos los cuales a pesar de que se compactan y se eligen no presentaran el mismo comportamiento que la base de la cortina la cual presenta el material de sitio, que sería la geología.

Con todos estos aspectos se puede observar que tanto la geología de sitio, la geología regional y los materiales con los cuales se va a construir la presa son de gran importancia,

ya que se puede inferir los diferentes modos de vibrar para las presas que ya están construidas o para las presas que lleguen a construirse en un futuro. Por lo tanto, el estudio preliminar de cada proyecto representa un punto importante el cual no debe ser minimizado y debería realizarse un buen estudio geológico-geotécnico.

BIBLIOGRAFÍA

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2007). La cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. 15/11/2007, de SEMARNAT Sitio web: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/402/cuencas.html>
- Rubio, H., & Triana C. Gestión Integrada de Crecientes Caso de Estudio México: Río Grijalva. Programa Asociado de Gestión de Crecientes, Organización Meteorológica Mundial (OMM), Global Water Partnership (GWP). Septiembre 2006 Sitio web: https://www.floodmanagement.info/publications/casestudies/cs_mexico_full.pdf
- Comisión Nacional del Agua (diciembre 2015). Atlas del Agua en México 2015. Ciudad de México: D. R. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua (noviembre, 2014). Estudio para el proyecto hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar el agua (PROHTAB). Informe Final. Capítulo 4. *Análisis del funcionamiento del sistema de medición hidrométrica y climatológica*. México.
- Castro-Mora J., Almazán-Esqueda, S., Morales-García, R., Bustamante-Yáñez, M.A., Flores-Galicia, E., Gómez-Caballero, J.A., Mora-Rivera, C., MartínezHernández, P., Arango-Quiroz, G., Velázquez-Pérez, F.G., Chavarín-Antonio, O., López-Oropeza, R.S., Ortiz-Hernández, L.E., Praga-Pérez, J.J., Sánchez- 131 Ramírez, D., Sabanero-Sosa, H., Mérida-Cruz, A. y A., González-Ramos. (1999). Monografía Geológico-Minera del estado de Chiapas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Coordinación General de Minería. Editadas por el Consejo de Recursos Minerales Centro Minero. 178p
- Mora, J.C., González, R., Aguirre, J., García-Moreno, L.M., Lovera, S.S., AP., Gil, A., De los Santos, RI., Balbuena, I.J., Vázquez, N.E., Torrijos, M.A., Jiménez-Franco, A. & Mijares, H. (2016). Microzonificación sísmica, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. México. UNAM, Instituto de Geofísica (UNAM), Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Posgrado de Ciencias de la Tierra (UNAM), Instituto de Ingeniería (UNAM), Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres, Estado de Chiapas.
- Castro-Mora, J. Estructura Geológica del Estado de Chiapas. Instituto de Geofísica, UNAM. Sitio Web: <https://www.yumpu.com/es/document/read/14641680/estructura-geologica-del-estado-de-chiapas>
- <https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/hidrografia-de-mexico/regiones-hidrologicas.html>
- CENAPRED. (2015). Regionalización Sísmica en México. 2018. Sitio web: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/centro-nacional-de-prevencion-de-desastres/resource/459e6b2c-6b16-41ab-a64a-2c7274dfaf66>

- INIFED, Infraestructura Educativa. (2014). Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones. Vol. 4. Seguridad Estructural. Tomo II. Diseño por Sismo. México: Secretaría de Educación Pública (SEP).
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Sismología en México. 22 de marzo 2017, de Gobierno de México Sitio web: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). SISMOS: Causas, características e impactos. 02 de octubre de 2017, de Gobierno de México Sitio web: <https://www.gob.mx/sgm/es/articulos/sismos-causas-caracteristicas-e-impactos?idiom=es>
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. Sismicidad en México. de SMI Sitio web: <http://www.smis.org.mx/sismicidad.html>
- Saez, Miguel. (2016). Correlación cruzada de ruido sísmico para la obtención de perfiles profundos de velocidad de onda de corte en la cuenca de Santiago. 10.13140/RG.2.2.22808.24325.
- Comisión Federal de Electricidad. Comportamiento de presas construidas en México (1974-1984), Vol II. Comisión Federal de Electricidad, México, 1985.
- Comisión Federal de Electricidad. Comportamiento de Presas construidas en México. Vol. VII. Comisión Federal de Electricidad, 1985.
- CONAGUA. (octubre de 2014). Organismo de Cuenca Frontera Sur. Consejo de Cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta. *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta*. UNICACH, Por la cultura de mi raza.
- Secretaría de Turismo. (2020). Estado de Chiapas. 28 febrero 2020, de chiapas.gob.mx Sitio web: <https://www.chiapas.gob.mx/ubicacion/>
- García, G. (2016). Análisis sísmico de presas de tierra y enrocamiento. Ciudad de México: Tesis. Programa de maestría y doctorado en Ingeniería, UNAM.
- Martínez, M. (2002). Análisis del comportamiento dinámico de la presa Chicoasén. México, D. F.: Tesis. División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica. Facultad de Ingeniería, UNAM
- Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall.
- Rufino, U. (2017). Análisis del comportamiento dinámico de la cortina de la presa el infiernillo bajo la influencia de un sismo en su componente transversal. México, D. F.: Tesis. Programa único de especializaciones de ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Flores, R. (2016). La geotecnia en Ingeniería de presas de tierra y enrocamiento. En Séptima Conferencia Raúl J. Marsal (59-60). México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.
- Flores, R., Hristov V & Li X. (2001). Geotecnia en ingeniería de presas. México: IMTA, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).