



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
“ACATLÁN”**

**SELECCIÓN DEL SITIO Y ESTUDIO  
GEOTÉCNICO EN LAS CENTRALES DE ENERGÍA  
POR REBOMBEO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

**PRESENTA:  
ENRIQUE FLORES PÉREZ**

**CON LA ASESORÍA DE:  
DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE**

**MÉXICO, D.F.**

**2006**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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

Gracias Dios, por darme esta vida, rodeado de tanta gente que me quiere.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Acatlán: por la formación académica recibida.

Al Dr. José María Chávez Aguirre:  
Por sus invaluable apoyo, que no se limita a lo académico.

Al Ing. Miguel Moisés Zurita:  
Gracias por apoyarme al inicio de mi carrera, cuando creía no poder, usted me impulsó.

A los profesores y profesoras que me transmitieron sus conocimientos, y aún lo hacen de cierta manera.

## DEDICATORIAS

A mis padres, esto es el fruto de su Amor, Trabajo y Esfuerzo. Gracias.

A mis hermanos Roberto, Juanita, Angélica, Elizabeth, Victoria y Christian, por alentarme toda la vida.

A Selene, John y Leslie.

A Paty, por tu apoyo, comprensión y amor.

A mis compañeros.

# CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	I
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES	1
1.1 Historia de las centrales de rebombeo	2
1.2 Ventajas de las centrales de energía por rebombeo sobre otras formas de generación de energía	3
1.3 Características generales	6
1.3.1 Vasos superior e inferior	6
1.3.2 Tubería a presión	9
1.3.3 Casa de máquinas	10
1.3.4 Turbinas	11
1.3.5 Generador	13
1.3.6 Transformador	15
1.3.7 Pozo de oscilación	16
1.3.8 Lumbrera de cables	17
1.4 Requisitos fundamentales para la construcción de una central de energía por rebombeo	17
1.4.1 Topografía	17
1.4.2 Disponibilidad de agua para el arranque de la planta	19
1.4.3 Disponibilidad de energía de base y distancia al centro de consumo	19
1.4.4 Estanqueidad de los vasos	20
2. ESTUDIOS PRELIMINARES	21
2.1 Mapas geológicos regionales	22
2.2 Interpretación fotogeológica e imágenes de satélite	23
2.3 Mapas geotécnicos	23
2.4 Disponibilidad de materiales de construcción	24
2.5 Resistencia, estabilidad y permeabilidad	26
2.6 Estabilidad de las laderas del embalse	29
2.7 Condiciones sismotectónicas	29
2.8 Carsticidad	30
2.9 Hidrogeología del embalse	31
2.10 Litología	32
2.11 Fracturamiento	34
2.12 Estratificación	38
2.13 Foliación	42
3. ESTUDIOS <i>IN SITU</i> , EXPLORACIÓN MEDIANTE SONDEOS Y GALERÍAS	43
3.1 Litología	44
3.2 Clasificación	45
3.3 RQD	53
3.4 Fracturamiento	54
3.5 Pruebas de permeabilidad	57
3.5.1 Prueba LeFranc	58
3.5.2 Prueba Lugeon	59

3.6	<b>Ensayes geofísicos</b>	61
3.6.1	Sondeos geoeléctricos	62
3.6.2	Sísmica de refracción	63
3.6.3	Sísmica de reflexión	63
3.6.4	Pruebas <i>up-hole, down-hole</i> y <i>cross-hole</i>	64
3.6.5	Sismos de diseño	66
3.6.6	Sismicidad inducida	68
3.6.7	Fallas activas	68
3.6.8	Método magnetométrico	71
4.	<b>PROSPECTOS EN MÉXICO</b>	72
4.1	<b>SITIO LOS CUARTONES (Evaluación)</b>	73
4.1.1	Localización del proyecto	73
4.1.2	Geología	74
4.1.3	Disponibilidad de agua	77
4.1.4	Bancos de material	77
4.2	<b>PROYECTO EL DESCANSO (Prefactibilidad)</b>	78
4.2.1	Localización del proyecto	78
4.2.2	Descripción del proyecto	79
4.2.3	Funcionamiento de la planta	83
4.2.4	Estudios geológicos	83
4.2.5	Estudios oceanográficos	84
4.2.6	Sismicidad y riesgo sísmico	84
4.3	<b>ALTERNATIVA CERRO EL TOPO PARA EL PHAEB MONTERREY (Factibilidad).</b>	87
4.3.1	Localización del proyecto	87
4.3.2	Descripción del proyecto	87
4.3.3	Geomorfología	89
4.3.4	Estratigrafía	90
4.3.5	Sismicidad y riesgo sísmico	91
4.3.6	Geología del sitio para vaso superior	95
4.3.7	Geofísica en el sitio para vaso superior	97
4.3.8	Exploración directa en el sitio para vaso superior	98
	<b>CONCLUSIONES</b>	102
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	104

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la energía eléctrica se ha convertido en un bien indispensable en nuestra vida cotidiana. Desde que nos levantamos, utilizamos aparatos que funcionan a base de electricidad. La satisfacción de esta necesidad es tarea de empresas privadas y paraestatales, como en nuestro país, donde la Comisión Federal de Electricidad es la encargada de producir, distribuir y comercializar el fluido eléctrico.

Existen varias formas de generar electricidad, como las centrales hidroeléctricas, que son ampliamente utilizadas en nuestro país. Las centrales termoeléctricas son otra opción, pero tienen la desventaja de que su funcionamiento óptimo es a plena carga, por lo que iniciar e interrumpir su ciclo para variar conforme a la demanda resulta caro e ineficiente.

Una alternativa a la creciente demanda de energía eléctrica son las Centrales Hidroeléctricas de Acumulación de Energía por Bombeo (CHAEB), que son plantas hidroeléctricas que funcionan como bombas elevando agua de un embalse inferior a otro superior con energía que toman del sistema en horarios de menor demanda. Almacenan el fluido que se convierte en energía potencial y en horas pico de demanda, convierten la energía potencial en energía eléctrica al accionar una turbina. En zonas como el norte y centro del país, el agua requerida en las centrales hidroeléctricas para la producción de energía es sumamente valiosa por su escasez. El empleo de centrales de energía por rebombeo es una solución viable en este tipo de sitios, ya que una vez llenados los vasos, no se requieren más que unos cuantos litros por segundo para recuperar las pérdidas por evaporación. En este trabajo se esquematiza una CHAEB, se analizan sus componentes y los estudios que deben llevarse a cabo para una central de este tipo y se sintetizan estudios realizados en el país.

## CAPÍTULO 1: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA POR REBOMBEO



Vista aérea del vaso superior de la planta de bombeo localizada cerca del poblado de Vianden, en Luxemburgo.



# 1. ASPECTOS FUNDAMENTALES

**OBJETIVO:** dar un panorama general del desarrollo de las Centrales Hidroeléctricas de Acumulación de Energía por Bombeo (CHAEB) a través de los últimos años, resaltando la importancia de esta forma de generación de energía en lugares donde la disponibilidad de agua se ve limitada por diversos factores. También se verán las partes integrantes de una central y sus características.

## 1.1 HISTORIA DE LAS CENTRALES DE REBOMBEO

Este tipo de proyectos, llamados sencillamente Rebombado o CHAEB, parecen ser una alternativa viable a la generación de energía eléctrica en sitios donde los recursos hídricos escasean y aunque su etapa de estudios no es tan espectacular como las grandes hidroeléctricas construidas, sí tienen un cierto grado de complejidad y presentan características peculiares. En México, aunque aún no se construye una planta de este tipo, se encuentran en este momento diversos estudios, que van desde la etapa de gran visión, hasta la de factibilidad, como en el caso del proyecto ubicado en el cerro El Topo, en el estado de Nuevo León.<sup>14</sup>

La utilización de estas centrales es para cubrir las necesidades de energía de las grandes ciudades en horas pico, principalmente las del centro y norte del país, cuya disponibilidad de agua es reducida y no permite el desarrollo de grandes plantas hidroeléctricas.

Este tipo de plantas generadoras de electricidad tiene sus orígenes en la década de 1920, con la construcción de la primera central en Suiza, posteriormente se expandieron a Europa. En 1959 se comenzaron a utilizar en Japón, en los años sesenta en Australia y a inicios de 1980 se manejaron en Sudáfrica. Aún cuando ni en número ni en diversidad se asemejan a las plantas hidroeléctricas, las plantas de acumulación de energía por bombeo presentan particularidades y sus características pueden ser muy variables. La capacidad instalada puede ser menor a 1 MW, como la Central Jelenec, en Checoslovaquia, hasta con más de 2000 MW como la de Bath Country en USA (Sullemberger, 1986) que cuenta con 330m de carga.<sup>11</sup>

Una de las plantas de acumulación más antiguas es la que se encuentra en Connecticut, USA (American Society of Mechanical Engineers, 2003):

### ***Planta Hidroeléctrica de Acumulación por Bombeo “Rocky River”***

La Connecticut Light & Power Company fue pionera en el uso del almacenamiento por bombeo en los Estados Unidos con esta estación hidroeléctrica. Operada por vez primera en 1929, tenía dos bombas reversibles. Esto permitió mejoras significantes en la eficacia del sistema de la red eléctrica de la compañía. El agua se bombea de forma ascendente a través de una lumbrera y se almacena en el Lago Candlewood. Cuando la curva de demanda se encuentra en una cresta, el agua se vierte a través de la misma lumbrera, y los motores que manejan las bombas se invierten para convertirse en generadores de electricidad. La lumbrera original, construida en 1927, se restauró en 1963.

## **1.2 VENTAJAS DE LAS CENTRALES DE DE ENERGÍA POR REBOMBEO SOBRE OTRAS FORMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

Los proyectos hidroeléctricos aprovechan la energía de un recurso renovable, para producir energía eléctrica. El desarrollo de embalses para diversos usos ha quedado evidenciado en la historia de la humanidad desde tiempos remotos. También es evidente que en muchos casos se ha hecho un mal uso de estos, lo cual trae a la par de beneficios, males que en ocasiones han sido catastróficos, como lo demuestran la construcción de grandes presas alrededor del mundo que en la actualidad se tienen como origen de vectores transmisores de enfermedades como la esquistosomiasis, malaria, y oncocercosis, entre otras. Las grandes presas son cuestionadas en la actualidad debido a la confrontación entre los beneficios obtenidos con su construcción y la pérdida del patrimonio cultural de pueblos, a la desaparición de sus poblados bajo el agua, y a la alteración de sus relaciones culturales, sociales y económicas; en general, a la trasgresión a su derecho de vivir.

La retribución en términos monetarios de las afectaciones a las tierras y a los bienes producto de éstas, es también duramente criticado, porque la experiencia indica que se produce una desarticulación entre la gente con su región, propiciando un incremento en el fenómeno migratorio hacia las urbes.

A raíz de lo anterior, se ha puesto atención a este tipo de problemas ambientales relacionados con algunas actividades de la ingeniería civil, movimiento que tiene repercusiones alrededor del mundo. En países como Estados Unidos, Canadá, Francia, Noruega e Italia, surgieron los modelos básicos que regulan y reglamentan las actividades relacionadas con el desarrollo de proyectos hidroeléctricos dentro de un contexto de protección ambiental. Entre lo analizado en este movimiento, se tiene lo siguiente: la energía producida por medio de centrales hidroeléctricas es limpia, y económicamente valiosa, y los embalses de sus presas fomentan la implementación de desarrollos acuícolas, facilitan la creación de desarrollos turísticos, controlan las avenidas de los ríos, favorecen la dotación de agua para usos agrícolas y para consumo humano, y constituyen vías de comunicación para las comunidades alejadas, entre otras. Sin embargo, también se reconoce la necesidad de hacer congruentes los desarrollos con los sistemas ambientales prevalecientes en la región, al identificar plenamente los impactos desfavorables derivados de la actividad, previniéndolos en lo posible y adoptando medidas que mantengan los equilibrios entre los ecosistemas originales y entre las comunidades sociales.

A raíz de lo anterior, el desarrollo de proyectos ingenieriles destinados a cubrir la demanda de electricidad ahora toma en cuenta lo que se denomina desarrollo sustentable. Los sectores productivos de cualquier país continúan demandando el suministro de energía para sustentar su crecimiento y con ello emplear una fuerza de trabajo cada vez mayor; por otra parte, la sociedad exige que cualquier actividad respete el ambiente y su equilibrio, que las próximas generaciones también dispongan de un lugar armónico para habitar. Ambas metas deben ser viables y converger.

En México, las autoridades y los técnicos especializados de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), una de las dos instituciones del país que planean, diseñan, construyen y operan grandes presas, se han convencido de la importancia del desarrollo sustentable. Para regular las actividades del sector eléctrico, se han creado leyes y reglamentos que definen las reglas a seguir en cuanto a la conservación del ambiente, la responsabilidad de la

Federación, Estados y Municipios para atender cualquier asunto relacionado con la política ecológica, el ordenamiento ecológico, el impacto y riesgo ambiental, entre otras.

Las características del régimen natural de escurrimiento fluvial son modificadas por el aprovechamiento hidroeléctrico. Al diseñar las CHAEB para operar en horas pico, usualmente 4 horas diarias de lunes a sábado, se altera el flujo medio horario: en la mayor parte del día se suspende el escurrimiento y solo en unas pocas horas se vierte un caudal importante. Las especies acuáticas, aguas abajo del aprovechamiento peligran por el cambio brusco de las condiciones de su ecosistema, así como las actividades humanas ya que en este sitio el cauce no ejerce una función de autorregulación. En este sentido, las Centrales de Acumulación por Bombeo no presentan estas alteraciones al ambiente que las rodea, ya que no aportan ni sustraen agua del mismo, si bien requieren de unos cuantos litros por segundo para recuperar las pérdidas que se tienen por evaporación.

El mayor impacto positivo que se tiene con la construcción de presas para el sector eléctrico lo constituye la regulación de las inundaciones que se tiene al represar el agua, que de otra forma, sería fuente de cuantiosas pérdidas para el país y sus habitantes. Al regular el escurrimiento, se permite que el agua tome su cauce de manera controlada, y no se corre el riesgo de inundaciones, salvo algunas excepciones que se han visto en los últimos años, como en el caso de la parte central del país, donde debido a las lluvias torrenciales que se dieron, las presas se llenaron y hubo de ser necesario desfugarlas, lo que causó inundaciones en las poblaciones aguas abajo de las mismas. En las CHAEB no se presentaría este problema por lo expuesto anteriormente, donde no se aporta ni se requiere agua adicional.

Al construir el embalse en una central hidroeléctrica, las condiciones fisicoquímicas se alteran, produciéndose una estratificación térmica significativa. En el fondo se forma ácido húmico, producto de la descomposición de la materia orgánica, lo que produce una coloración ocre y un olor desagradable; a este efecto se le ha denominado "la enfermedad de las presas jóvenes". En las CHAEB se requiere de un volumen menor de agua para el arranque, aunque en algunos casos se necesitan varios millones de metros cúbicos. Además, el agua se encuentra en constante movimiento, lo que no permite una estanqueidad total propiciando una oxigenación, aún en el fondo de los vasos.

Como se puede ver, la generación de energía por medios alternos, como lo es el rebombado, resulta favorable tanto por cuestiones económicas como por ambientales; si bien no puede sustituir otras fuentes como son las termoeléctricas o hidroeléctricas, puede ser complementaria con éstas al obtener energía eléctrica en horas de bajo consumo para convertirla en energía potencial, y utilizarla en horas de mayor demanda, lo cual las hace atractivas.

En la República se tiene mucho potencial hidroeléctrico sin aprovechar. La planeación del desarrollo de proyectos hidroeléctricos con cara al futuro, actualmente se realiza con particular atención en los posibles impactos que se produzcan en los sistemas ambientales, desechando aquellos sitios donde los equilibrios sociales y ambientales sean frágiles. Desde las tempranas etapas de estudio se consideran las acciones preventivas, mitigatorias y compensatorias de dichos impactos, estimando sus costos asociados. Para ello, la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE ha establecido el "Proceso para el Desarrollo de Proyectos Hidroeléctricos", con objeto de lograr un ordenamiento en el aprovechamiento de los recursos energéticos de nuestro país.

El proyecto mencionado establece dentro de sus políticas operativas jerarquizar los proyectos en base a sus características técnicas, sociales y ambientales.

Como parte de la metodología del Proceso, se ha dividido al país en cinco regiones que a su vez agrupan a una o varias cuencas hidrográficas. Esta división se ha realizado fundamentalmente en función de las características hidroclimatológicas que presenta cada una de las cuencas. El proceso está integrado por tres etapas:

- 1) Planeación
- 2) Diseño-construcción, y
- 3) Operación

En la etapa de Planeación, la metodología planteada consiste en desarrollar los estudios básicos y de ingeniería preliminar que sustentan la viabilidad de los aprovechamientos; para lo cual se ha dividido en cuatro niveles de estudio el seguimiento ordenado de los proyectos, siendo estos:

- I) Identificación
- II) Gran Visión
- III) Prefactibilidad
- IV) Factibilidad

El avance de estas etapas constituye un mejor conocimiento de las condiciones existentes en la zona del proyecto.

En base a la preocupación que se tiene por el ambiente, se jerarquizan en la actualidad los proyectos hidroeléctricos, con los que se puede tener una similitud aplicable a las plantas de acumulación por bombeo, donde se ponderan social y ambientalmente los proyectos, desechando aquellos sitios donde los equilibrios del medio social y natural sean frágiles. Entre los criterios y estudios que se aplican se pueden mencionar los siguientes:

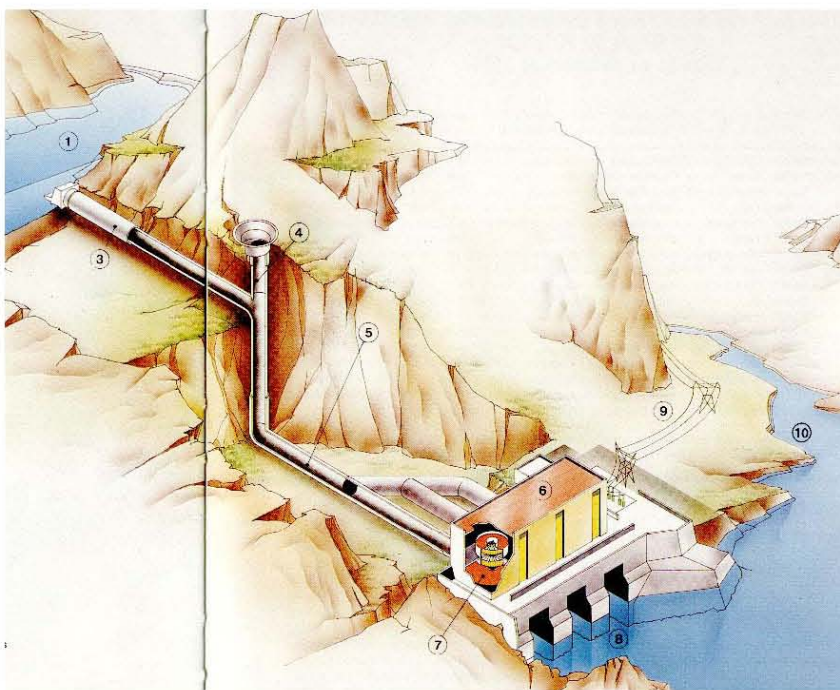
- Identificación de sitios dentro de áreas naturales protegidas.
- Jerarquización socioambiental de sitios, a través de metodologías propias y externas sobre sustentabilidad ambiental.
- Diagnóstico básico ambiental del sitio del proyecto, que caracteriza los principales componentes y relaciones del medio social y natural.
- Inventarios florísticos y faunísticos para reconocer especies con algún estatus ecológico.
- Muestreos sistemáticos de calidad del agua.
- Caracterización socioeconómica de la población afectada.
- Inventario de tierras y bienes distintos afectables.
- Registros agrarios.
- Caracterización de bienes, servicios y edificios públicos afectables.
- Normas y regulaciones ambientales que involucra el proyecto.
- Desarrollo de talleres multidisciplinarios para la identificación de impactos.
- Programas para la ejecución de medidas de mitigación.
- Especificaciones de protección ambiental para contratistas.
- Incorporación de costos de protección ambiental para construcción, entre otras más.

En términos generales, los grandes problemas que presentan las grandes presas son menores en las CHAEB y en algunos casos puede decirse que no se presentan, ya que el ambiente circundante no se ve afectado en gran medida por la construcción y operación de una central de acumulación de energía por bombeo. Además, una vez llenado uno de los vasos, únicamente se requiere de unos cuantos litros por segundo adicionales para reponer las pérdidas por evaporación, lo que no hace necesaria una fuente continua y caudalosa del recurso hídrico, tan valioso en sitios donde escasea.

### 1.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES

En la figura siguiente se muestran las partes principales de una CHAEB

#### Central Hidroeléctrica de Bombeo



1. Vaso superior
2. Bordo o muro
3. Galería de conducción
4. Pozo de oscilación
5. Tubería forzada
6. Central
7. Turbinas y generadores
8. Desagües
9. Líneas de transporte de energía eléctrica
10. Vaso inferior

**Figura 1.1.** Esquema de una Central de Rebombeo

#### 1.3.1 Vasos superior e inferior

Las características geológicas y topográficas definirán la factibilidad de estas partes del proyecto. El vaso superior y el más costoso generalmente, puede construirse empleando una de las tres formas siguientes (fig. 1.2):

- a) aprovechando una depresión y construyendo sólo uno o varios diques,
- b) construir la totalidad del embalse

c) excavando hasta conseguir una depresión artificial

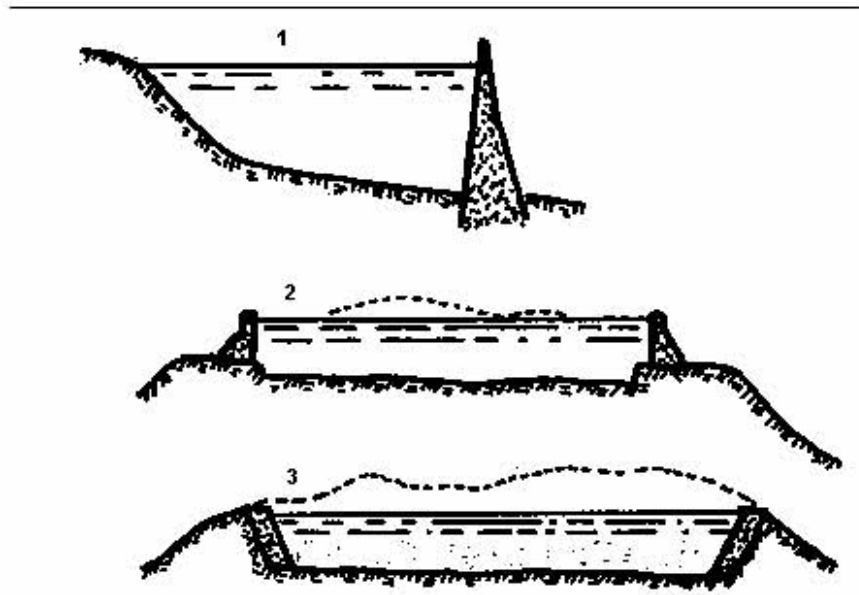


Figura 1.2. Vasos de almacenamiento.<sup>9</sup>

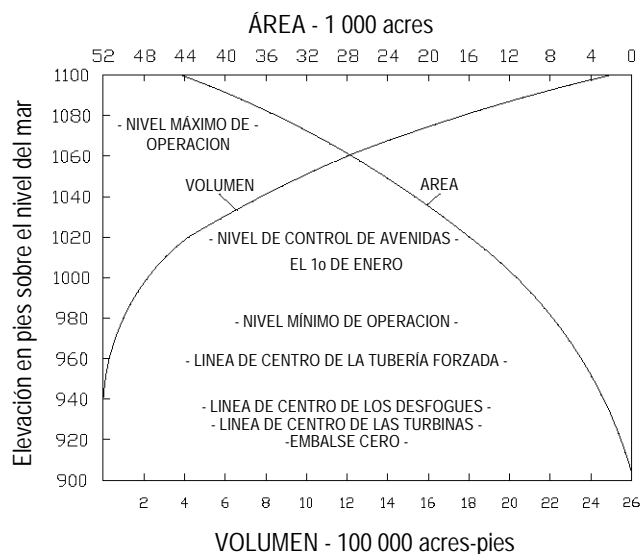
El vaso inferior suele ser más simple y se puede aprovechar un lago o embalse existente con sólo pequeñas modificaciones, aunque existen casos en donde el vaso inferior debe construirse totalmente, si bien en condiciones más ventajosas, al localizarse más cerca de las vías de acceso.<sup>6</sup>

Los proyectos hidroeléctricos que extraen directamente el agua de una corriente no pueden ser capaces de satisfacer las demandas durante los escurrimientos extremadamente bajos. Al vaso inferior de una CHAEB, por estar en la parte baja de un promontorio, le corresponde una cuenca donde las corrientes tributarias aportarán carga de agua que si no se controla en tiempos de avenidas causará problemas, y si se controla de forma eficiente, será utilizada en tiempos de estiaje para reponer las pérdidas por evaporación.

Cualquiera que sea la capacidad de un vaso, su función principal es la de estabilizar el régimen de escurrimiento del agua. En esta sección se tratarán los aspectos generales del diseño para los vasos superior e inferior de una central de energía por rebombeo.

### **Características físicas de los vasos de almacenamiento**

La característica física más importante de los vasos de almacenamiento es sin duda su capacidad de almacenamiento. La capacidad de un vaso de forma regular puede calcularse mediante las fórmulas para los volúmenes de sólidos. La capacidad de los vasos en sitios naturales debe determinarse por medio de levantamientos topográficos; una curva de áreas-elevaciones (fig. 1.3) se construye trazando el área comprendida dentro de cada curva de nivel del sitio del vaso de almacenamiento. La integral de la curva áreas-elevaciones es la curva de elevaciones o alturas-capacidades o curva de capacidades del vaso. El incremento de almacenamiento entre dos alturas o elevaciones, generalmente se calcula multiplicando el promedio de las áreas entre dos elevaciones por la diferencia de elevaciones. La suma de estos incrementos abajo de cualquier elevación, es el volumen almacenado abajo de ese nivel.



**Figura 1.3.** Curvas de alturas-capacidades y alturas-áreas para el vaso Cherokee en el río Houston, Tennessee (datos del TVA Technical, reporte 7)<sup>3</sup>

### *Niveles de almacenamiento*

El nivel normal de almacenamiento es la elevación máxima a la cual la superficie del vaso subirá durante las condiciones ordinarias de funcionamiento u operación. Para la mayoría de los vasos de almacenamiento éste queda definido por la cresta del vertedor o por la parte superior de las compuertas del vertedor.

El nivel mínimo de abastecimiento es la mínima elevación a la cual se trabajará el vaso en condiciones normales, y se fija tomando en cuenta las condiciones de la eficiencia de operación para las turbinas. El almacenamiento útil es el volumen de almacenamiento entre el nivel mínimo y el normal. Cuando los bordos o el banco de los vasos presentan cierta permeabilidad, el agua penetra al suelo cuando el vaso se llena y se drena cuando la superficie del agua baja. Este almacenamiento de bancos aumenta efectivamente la capacidad de almacenamiento arriba de la indicada por la curva elevaciones-capacidades. La cantidad del almacenamiento de bancos depende de las condiciones geológicas y del tratamiento que se le haya dado a los bordos y al desplante, y puede representar cierto porcentaje del volumen del vaso.

El agua en un cauce de una corriente natural ocupa un volumen variable de almacenamiento de valle. El incremento neto de la capacidad de almacenamiento que resulta por la construcción de un vaso, es igual a la capacidad total menos el almacenamiento natural de valle. La adquisición de terrenos o derechos de inundación sobre la tierra, es necesaria antes de que pueda construirse el vaso de almacenamiento. Los muelles, construcciones, alcantarillas, caminos y puentes, deberán localizarse arriba del nivel máximo del agua que se prevea en el vaso.

### *Transporte de azolves o sedimentos*

En una CHAEB no se requiere un aporte constante de agua, por lo que el problema de azolves generados por el arrastre de sedimentos por las corrientes no es significativo. Aún

así, el agua tenderá a intemperizar y erosionar las paredes y el fondo del vaso, lo que generará azolves que pueden dañar las turbinas. Sin embargo, si a una corriente no se le permite llevar su carga normal de azolve o sedimento, tenderá a socavar su lecho o sus bancos. La cantidad de sedimento en suspensión se conoce al secar y pesar los sólidos de una muestra de agua. La cantidad de sedimentos se expresa en partes por millón (ppm).

### *Control del azolve en los vasos*

El procedimiento más común para tratar con el problema de azolve o sedimentación es diseñar una parte de la capacidad del vaso como almacenamiento de azolves o sedimentos. Esto constituye una aproximación negativa que en ninguna forma reduce la acumulación de sedimentos, sino que pospone la fecha de cuando esto se vuelva serio. En la práctica, el azolve de los vasos no puede evitarse, pero sí retrasarse. Una forma de hacer esto, es seleccionar un sitio donde la aportación de sedimentos sea naturalmente baja. Algunas cuencas son fuentes más productoras de sedimentos, debido al tipo de suelo, vegetación, pendiente del terreno (paredes de los vasos), cubierta vegetal y características de la lluvia. Si hay otra alternativa para el sitio, esas fuentes muy productoras de azolve deben evitarse. Las terrazas, el cultivo en fajas y en contorno y técnicas similares, retrasan el escurrimiento sobre el terreno y reducen la erosión. La cubierta vegetal del suelo reduce la fuerza de impacto de la lluvia y minimiza la erosión.

### *Mareas y oleaje por el viento en los vasos*

La marea por el viento es una agitación en la superficie del agua, de manera que ésta queda por arriba del nivel del agua en calma en el lado protegido de adentro del vaso y abajo del nivel del agua en calma, por el lado opuesto del viento. Esto produce un desequilibrio hidrostático y debe ocurrir un escurrimiento de regreso a cierta profundidad. La pendiente de la superficie del agua que resulta es aquella necesaria para mantener al escurrimiento de retorno con las condiciones de rugosidad del fondo y con el área de sección transversal del escurrimiento que exista. Las mareas por el viento son mayores en los vasos poco profundos y con fondos ásperos.

### *Filtraciones en el vaso*

Un requisito importante en este tipo de centrales, es la permeabilidad de sus vasos, siendo inadmisibles las pérdidas por filtraciones excesivas. Aun en rocas sanas, existen ciertas filtraciones que de ser necesario, causarán que el macizo rocoso reciba un tratamiento a base de inyecciones a presión. Si el área de la fuga es grande, el costo de la inyección puede ser excesivo.

## **1.3.2 Tubería a presión**

La tubería a presión conduce el agua de un vaso a otro, pudiendo ser de tres tipos:

- a) enterradas, cuando se apoyan continuamente sobre el fondo de una zanja que se rellena posteriormente con un espesor de 1.2 a 2 m de mortero,



- b) tendida por superficie apoyada sobre silletas, que se emplea sobre todo cuando la superficie del terreno es suficientemente regular,
- c) cuando no se puede optar por ninguno de los casos anteriores, la solución es llevar la tubería a presión dentro de una lumbrera vertical e inclinada, requiriendo desde luego de la excavación previa de ésta.

En la figura 1.4 se ejemplifican algunos tipos de tubería a presión.

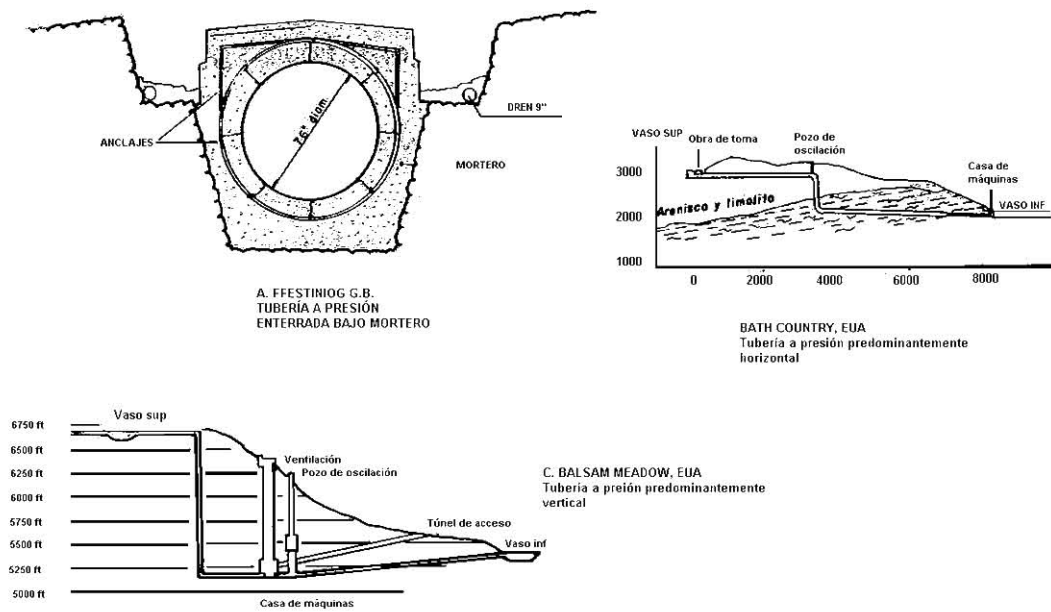


Figura 1.4. Tipos de tubería a presión<sup>16</sup>

### 1.3.3 Casa de máquinas

Esta suele ser una caverna excavada “ex profeso” o bien, cavidades creadas en la superficie. Su función es albergar dentro de sí las turbinas, bombas y máquinas síncronas; esta última sirve como motor y como generador. Aunque en plantas de construcción reciente y sobre todo de carga media o baja, las bombas y turbinas se han unificado en una máquina reversible o turbo-bomba. El arreglo de una casa de máquinas está gobernado principalmente por el tipo de eje que se seleccione para las máquinas a usar, que puede ser en general con eje horizontal o vertical. A continuación se presentan las ventajas y desventajas en las instalaciones de eje vertical y horizontal (Espinoza García 1975, en José Vargas, 1991)<sup>14</sup>:

#### *Ventajas de las instalaciones con eje horizontal:*

- 1.- Un solo piso de máquinas simplifica los servicios en forma conveniente. Una planta pequeña es suficiente.
- 2.- El montaje y la movilización de las máquinas es posible sin necesidad de equipo auxiliar.
- 3.- Se reduce la profundidad de la cimentación.

#### *Desventajas:*

- 1.- La casa de máquinas ocupa una gran superficie.

2.- Cuando existen fluctuaciones grandes en el desfogue, resulta costosa y complicada la instalación del piso de máquinas debajo del nivel máximo de desfogue.

*Ventajas de instalaciones de eje vertical:*

- 1.- Se reduce la superficie de la casa de máquinas
- 2.- El generador y el equipo eléctrico auxiliar puede ser instalado arriba o levemente abajo del nivel máximo de agua, aun en el caso de fluctuaciones considerables del tirante de agua.

*Desventajas:*

- 1.- La operación de las máquinas no es fácilmente inspeccionada. El incremento en el número de pisos de casa de máquinas hace más difícil el suministro de servicios y puede ocasionar incremento de personal.
- 2.- Para su instalación y mantenimiento es necesaria una grúa viajera.
- 3.- Requiere cimentación profunda.

### 1.3.4 Turbinas

Una turbina es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua, vapor de agua o gas. El elemento básico de la turbina es la rueda o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico o una hélice.

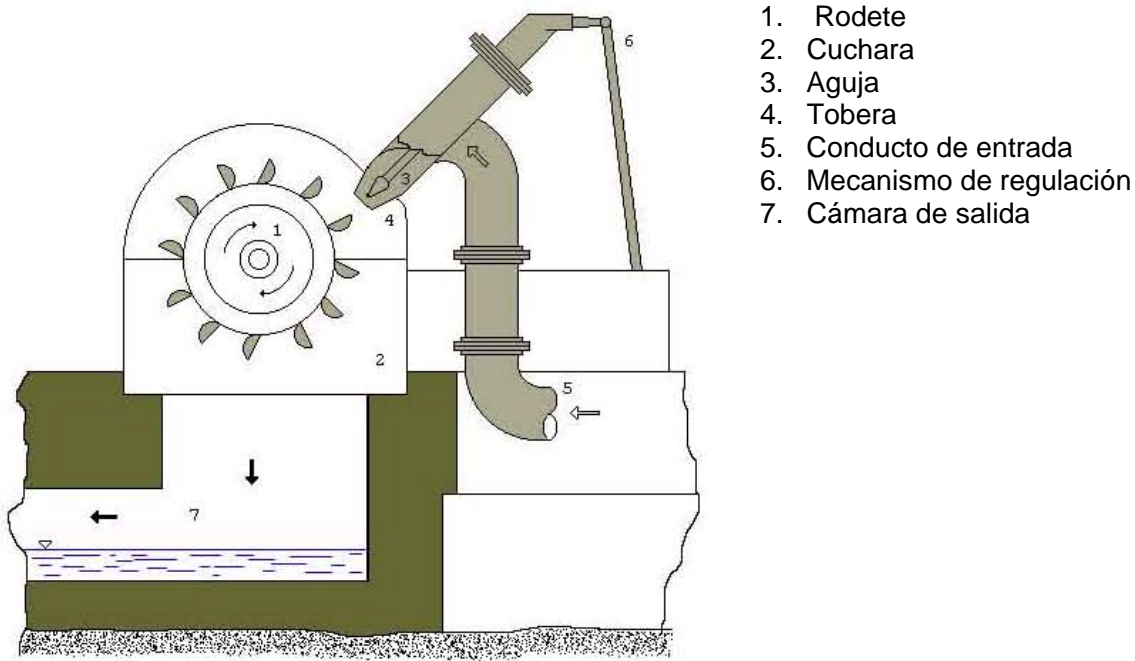
*Funcionamiento de las turbinas hidráulicas*

Para mantener una salida constante de voltaje la velocidad de la turbina debe mantenerse constante, independientemente de las variaciones de la presión del agua que las mueve. Esto requiere gran número de controles que, tanto en la turbina Francis como en la Kaplan, varían el ángulo de las palas. En las instalaciones de ruedas Pelton, el flujo del agua se controla abriendo y cerrando las boquillas eyectoras. En este caso, se utiliza una boquilla de derivación de descarga, dado que los cambios rápidos de corriente en canales de caída largos podrían producir el efecto conocido como golpe de ariete. Con estos ajustes, se mantiene constante el flujo de agua a través de las boquillas. Para ello se cierran las boquillas de descarga, lo que se hace con mucha lentitud para evitar el golpe de ariete.

*Tipos de turbinas*

**Rueda Pelton:**

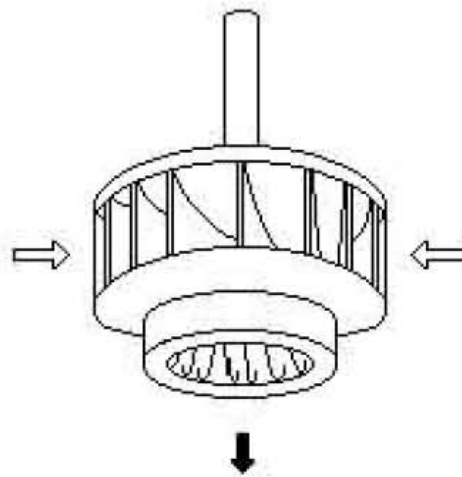
En la figura se muestra un croquis de la turbina en conjunto para poder apreciar la distribución de los componentes fundamentales. Un chorro de agua convenientemente dirigido y regulado, incide sobre las cucharas del rodete que se encuentran uniformemente distribuidas en la periferia de la rueda. Debido a la forma de la cuchara, el agua se desvía sin choque, cediendo toda su energía cinética, para caer finalmente en la parte inferior y salir de la máquina. La regulación se logra por medio de una aguja colocada dentro de la tobera. Este tipo de turbina se emplea para *saltos grandes y presiones elevadas*.



**Figura 1.5.** Turbina Pelton

Turbina tipo Francis:

Para saltos medianos se emplean las turbinas Francis, que son de reacción.



**Figura 1.6.** Turbina tipo Francis

En el dibujo anterior podemos apreciar la forma general de un rodete y el importante hecho de que el agua entre en una dirección y salga en otra a 90°, situación que no se presenta en las ruedas Pelton. Las palas o álabes de la rueda Francis son alabeadas. Estas turbinas en vez de toberas, tienen una corona distribuidora del agua. Esta corona rodea por completo al rodete. Para lograr que el agua entre radialmente al rodete desde la corona distribuidora existe una cámara espiral o caracol que se encarga de la adecuada dosificación en cada

punto de entrada del agua. El rodete tiene los álabes de forma adecuada como para producir los efectos deseados sin remolinos ni pérdidas adicionales de carácter hidrodinámico.

Turbina Kaplan:

En los casos en que el agua sólo circule en dirección axial por los elementos del rodete, tendremos las turbinas de hélice o Kaplan que tienen álabes móviles para adecuarse al estado de la carga. Esta turbinas aseguran un buen rendimiento aun con bajas velocidades de rotación. La figura 1.7 muestra un croquis de turbina a hélice o Kaplan.

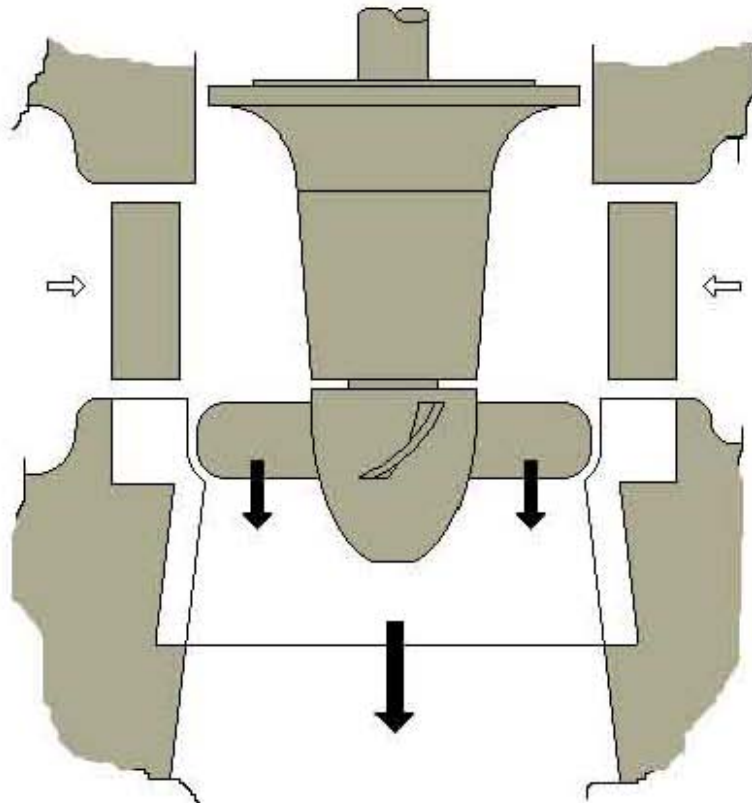


Figura 1.7. Turbina Kaplan

En términos generales:

- La rueda Pelton conviene para saltos grandes.
- La turbina Francis para saltos medianos.
- La turbina de hélice o turbina Kaplan para saltos pequeños.

### 1.3.5 Generador

La energía eléctrica se produce en los aparatos llamados *generadores* o *alternadores*. Un generador consta, en su forma más simple de:

- Una espira que gira impulsada por algún medio externo.
- Un campo magnético uniforme, creado por un imán, en el seno del cual gira la espira anterior.

A medida que la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, induciéndose una fuerza electromotriz, y si existe un circuito externo, circulará una corriente eléctrica. Para que un generador funcione, hace falta una fuente externa de energía (hidráulica, térmica, nuclear, etc.) que haga que la bobina gire con una frecuencia deseada. En general, la energía mecánica procede de la transformación de la energía potencial del agua almacenada en un embalse; de la energía térmica suministrada al agua mediante la combustión del carbón, petróleo, gas natural, o a través de la energía de fisión del uranio. Para realizar la conversión de energía mecánica en eléctrica, se emplean unos generadores más complicados que los señalados en el párrafo anterior, que constan de dos piezas fundamentales:

- El estator: armadura metálica, que permanece en reposo, cubierta en su interior por unos hilos de cobre, que forman diversos circuitos.
- El rotor: está en el interior del estator y gira accionado por la turbina. Está formado en su parte interior por un eje, y en su parte más externa por unos circuitos, que se transforman en electroimanes cuando se les aplica una pequeña cantidad de corriente.

Cuando el rotor gira a gran velocidad, debido a la energía mecánica aplicada en las turbinas, se produce unas corrientes en los hilos de cobre del interior del estator. Estas corrientes proporcionan al generador la denominada fuerza electromotriz, capaz de producir energía eléctrica a cualquier sistema conectado a él.

La turbina es accionada por la energía mecánica del vapor de agua a presión o por un chorro de agua y es la encargada de mover el rotor del generador y producir la corriente eléctrica. Todas las centrales eléctricas constan de un sistema de "turbina-generador" cuyo funcionamiento básico es, en todas ellas, muy parecido, variando de unas a otras la forma en que se acciona la turbina.



**Figura 1.8.** Serie de generadores

### 1.3.6 Transformador

Los transformadores son probablemente la parte del equipo de mayor uso de la industria eléctrica. Varían en tamaño desde unidades miniatura para calculadoras, hasta unidades gigantescas utilizadas en las centrales de distribución de energía eléctrica. Sin embargo, todos los transformadores tienen las mismas propiedades básicas. Cuando existe una inducción mutua entre dos bobinas o devanados, un cambio en la corriente que pasa por uno de ellos induce un voltaje en el otro. Todos los transformadores poseen un devanado primario y uno o más secundarios. El primario recibe energía eléctrica de una fuente de alimentación y acopla ésta al secundario mediante un campo magnético variable. La energía toma la forma de una fuerza electromotriz que pasa por el secundario y si se conecta una carga a éste, la energía se transfiere a la carga.

Cuando un transformador está funcionando, pasa corriente alterna por sus devanados y se establece un campo magnético alterno en el núcleo de hierro. Como resultado, se producen pérdidas de cobre y hierro que representan potencia real (watts) y que hacen que el transformador se caliente. Para establecer un campo magnético se requiere de una potencia reactiva (vars) que se obtiene de la línea de alimentación. Cuando el voltaje del primario se eleva más allá de su valor nominal, el núcleo de hierro (laminaciones) comienza a saturarse y la corriente de magnetización (de excitación) aumenta con rapidez. Las corrientes de corto circuito provocadas por desastres naturales o por el hombre pueden ser muy grandes, y a menos que se interrumpan queman al transformador en poco tiempo. Para enfriar a los transformadores se sumergen en aceite.

El transformador trifásico es básicamente igual al monofásico solo que el primero tiene entrada para tres voltajes de igual magnitud y frecuencia, pero desfasados entre sí; esto es, para cualquier instante  $t$  cualquiera, el voltaje de cada línea y el neutro es diferente.

### 1.3.7 Pozo de oscilación

En las plantas hidroeléctricas los conductos a presión están constituidos por túneles, tuberías y pozos de oscilación. Los pozos de oscilación se pueden construir de variadas formas, siendo uno de los más comunes el que se muestra en la siguiente figura:

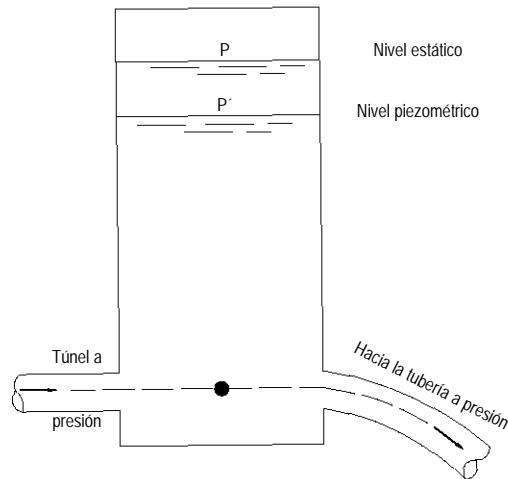


Figura 1.9. Pozo de oscilación.<sup>7</sup>

En la figura 1.10, donde se ilustra una instalación hidroeléctrica semejante a la planta hidroeléctrica de Mazatepec, Pue., se ve que consiste en un túnel construido entre el vaso de regulación y el pozo de oscilación, donde este último se localiza en la unión entre el túnel y la tubería a presión. En una instalación ordinaria el pozo de oscilación actuará como una cámara de carga.

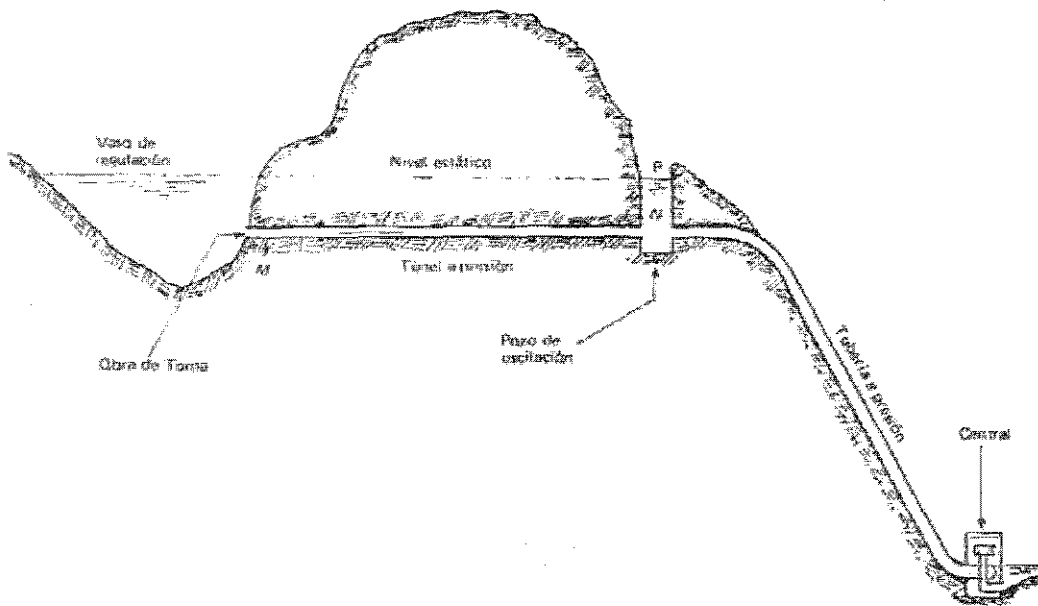


Figura 1.10. Perfil de una central hidroeléctrica.<sup>7</sup>

En su forma más simple el pozo de oscilación es una excavación de eje vertical, de sección transversal constante, excavado en el flanco de la montaña y en el fondo del cual desembocarán el túnel a presión y el orificio de entrada a la tubería. En el ejemplo mostrado, es una sola tubería a presión, aérea. Cuando las máquinas están paradas, el nivel del agua en el pozo de oscilación se establece en P, al mismo nivel del agua en el vaso; este es el nivel estático. Es necesario dejar claro que cuando el vaso esté lleno el pozo de oscilación no debe desbordar, por lo que su altura debe considerar tal efecto.

Cuando la planta funciona con cierto gasto Q (fig. 1.9) el nivel del agua en el pozo baja y se establece el nivel piezométrico P'; el desnivel PP' mide la pérdida de carga en el túnel a presión debida a Q. Si por un incidente de operación el gasto Q se interrumpe bruscamente en la casa de máquinas (cierre rápido de las válvulas de admisión de agua a las turbinas), se produce un golpe de ariete cuya onda se propaga remontando la tubería de presión, desde las válvulas hasta el pozo de oscilación. Si éste no existiera, la onda del golpe de ariete se seguiría propagando a lo largo del túnel hasta el vaso de almacenamiento.

La existencia de un pozo de oscilación cambia las condiciones, por lo que se debe tomar en cuenta que la teoría del golpe de ariete supone una conducción desprovista de elementos locales deformables. Con esta hipótesis, las ondas de presión y velocidad, creadas por las variaciones del gasto, se propagan dentro del líquido del conducto, sin experimentar movimiento el conjunto. Pero, si el conducto está dotado de elemento deformable (superficie libre del pozo de oscilación), la deformación provoca un movimiento del conjunto de líquido que se puede superponer al de las ondas.

Cualesquiera que sean las condiciones, el cálculo y la experiencia demuestran que la presencia de un pozo de oscilación bien dimensionado reduce y hace prácticamente despreciable el golpe de ariete que, proveniente de la tubería a presión, penetra en el túnel a presión.

### **1.3.8 Lumbrera de cables**

Las lumbreras en general son excavaciones circulares utilizadas para ventilación, comunicación y en el caso de la lumbrera de cables, para conducir estos elementos hacia la subestación que se encuentra en la parte superior de la casa de máquinas. En la lumbrera se alojan además de los cables, estructuras para la retención de los primeros, buses, cables de potencia, plataformas, escaleras, etc. Es de importancia tomar en cuenta la existencia de agua, ya que como en casi todas las estructuras, afecta grandemente la presencia del nivel freático.

## **1.4 REQUISITOS FUNDAMENTALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL DE ENERGÍA POR REBOMBEO**

### **1.4.1 Topografía**

En una CHAEB, es necesario tener un buen desnivel entre los vasos en distancias horizontales cortas que hagan posible y costeable la producción de energía. La siguiente tabla muestra la relación L/H (carga y longitud) para varios sitios estudiados en la región de Monterrey en la etapa de evaluación.



VASOS SUP		VASOS INFERIORES		
		SAN FCO	EL GRINGO	CUARTONES
CUARTONES (INTUAL)	Hm	1050	760	790
	Lm	4170	2700	2000
	L/H	3.97	3.55	2.53
EL ALTO	Hm	1250	960	990
	Lm	3500	1800	2000
	L/H	2.8	1.87	2.02
LA TINAJA	Hm	990	700	730
	Lm	4400	2500	2800
	L/H	4.44	3.57	3.83
CO. SAN FCO.	Hm	830	540	570
	Lm	2000	1200	1000
	L/H	2.4	2.22	1.75

**Tabla 1.1.** Comparación de desniveles para varias opciones de vasos superior e inferior.<sup>11</sup>

La relación L/H fluctúa entre 1.75 (San Francisco-Cuartones) y 4.44 (La Tinaja-San Francisco), lo que confirma lo expuesto al principio de este párrafo.

A continuación se muestran algunas condiciones que pueden ser útiles cuando se realicen los trabajos de topografía.

Una de las primeras preocupaciones es comunicar la zona objeto de estudio con la red de caminos, ferroviaria o fluvial. Es necesario construir caminos de penetración para transportar equipo ligero, provisiones y mantener contacto con las brigadas de estudio. Después de un reconocimiento terrestre o aéreo, se fijan los monumentos básicos para apoyar los levantamientos topográficos. Es conveniente contar con una triangulación geodésica; la longitud de sus lados depende de las características del terreno. Las referencias que se instalen deben ser permanentes, pues no sólo se requerirán en la etapa de los estudios y la construcción de la obra, sino también para observar su comportamiento posterior. Esta triangulación debe ligarse a referencias fijas del país, en particular las de nivelación.

### **Topografía de los vasos**

El levantamiento topográfico se realiza con fotografías aéreas apoyadas en los bancos de la red geodésica y otros auxiliares. En ciertos casos se combinan estos trabajos con perfiles obtenidos mediante radar o láser. Sin embargo, lo usual es hacer los levantamientos con poligonales alrededor del vaso propuesto y el levantamiento detallado con equipo topográfico altamente especializado como las estaciones totales, que están conectadas a un satélite y se pueden obtener las coordenadas geográficas al instante. Las escalas convenientes para el dibujo de los planos dependen del área del embalse. La siguiente puede ser una guía.

Área del vaso, en km <sup>2</sup>	Escala
10	1 : 5,000
100	1 : 10,000
1000	1 : 25,000
5000 o mayor	1 : 50,000

**Tabla 1.2.** Escalas usuales para planos topográficos

Los sitios donde se planea instalar las tuberías de conducción y casa de máquinas, entre otros, deben tener un estudio topográfico detallado, usualmente a escalas de 1:1000 a 1:10,000, con curvas de nivel a cada 10m.

#### 1.4.2 Disponibilidad de agua para el arranque de la planta

Para que una planta de rebombeo inicie sus actividades, es necesario proveerla de varios millones de metros cúbicos de agua, como lo muestra la tabla siguiente, donde se han condensado valores iniciales de agua en sitios estudiados en el área de Monterrey y la fuente de donde se podría obtener el líquido (CFE, Estudios Geológicos en Proyectos de Acumulación de Energía por Bombeo en la Región de Monterrey, 1991):

SITIO	ETAPA DE ESTUDIO	POTENCIA (MW)	CAPACIDAD DE AGUA REQUERIDA (millones de m <sup>3</sup> )	FUENTE
Los Cuartones	Evaluación	1000	5	Galería filtrante
Chancaca-Marrubial	Prefactibilidad	1800	45	Río Santa Catarina
Potrero de Serna	Prefactibilidad	No definida	1.5	Subcuenca San Francisco (arroyo Corral de Piedra)
Cerro El Topo	Factibilidad	200	0.8	Planta de tratamiento de aguas negras (planta Canadá)

**Tabla 1.3.** Posibles fuentes utilizables para el llenado inicial de una CHAEB.

En la tabla anterior se observa que el agua se puede obtener de muy diversas fuentes, desde ríos hasta aguas residuales tratadas. De igual manera, el agua requerida puede ser de menos de 1 millón de metros cúbicos, hasta más de cuarenta.

#### 1.4.3 Disponibilidad de energía de base y distancia al centro de consumo

Una central de rebombeo no aporta energía extra al sistema eléctrico, sino que solamente difiere su uso para aquellas horas en que la demanda es mayor. Este hecho hace necesario disponer de energía para "jalarla" hacia la central, donde se almacenará en forma de energía potencial al elevar el agua del vaso inferior al superior en horas de baja demanda, para después dejarla caer por medio de la tubería a presión y transformar esa energía almacenada a energía mecánica, y ésta, al pasar por los álabes de la turbina, se transforma en energía eléctrica, que podrá ser suministrada a los consumidores en horas donde la demanda es mayor. De esta manera, en etapas tempranas de investigación se debe hacer un análisis de las centrales eléctricas y su estado con respecto a la oferta y demanda, para estimar la capacidad sobrante que pueda ser utilizada para bombear el agua, y su localización deberá ser lo más cercana posible, para que los costos en "transporte" de energía no sean tan elevados, que se vea comprometida la realización del proyecto por esta causa.

En la región de Monterrey, donde se ha dado una gran investigación para construir una planta de este tipo, se tienen varias alternativas para abastecer de energía a sus industrias,

cada vez más grandes y que por lo tanto requieren importantes cantidades de electricidad, se tiene un ejemplo de disponibilidad de energía base y distancia al centro de consumo, pues pertenece a la región noreste de México, y de las seis sub-áreas en que se divide la región, es la que tiene picos de demanda muy marcados y variables de acuerdo a la época del año. La energía base se puede tomar del sistema, que incluye plantas de varios tipos, como vapor (Planta Monterrey), turbogas (Fundidora), ciclo combinado (Huinala) e hidroeléctricas (El Salto).

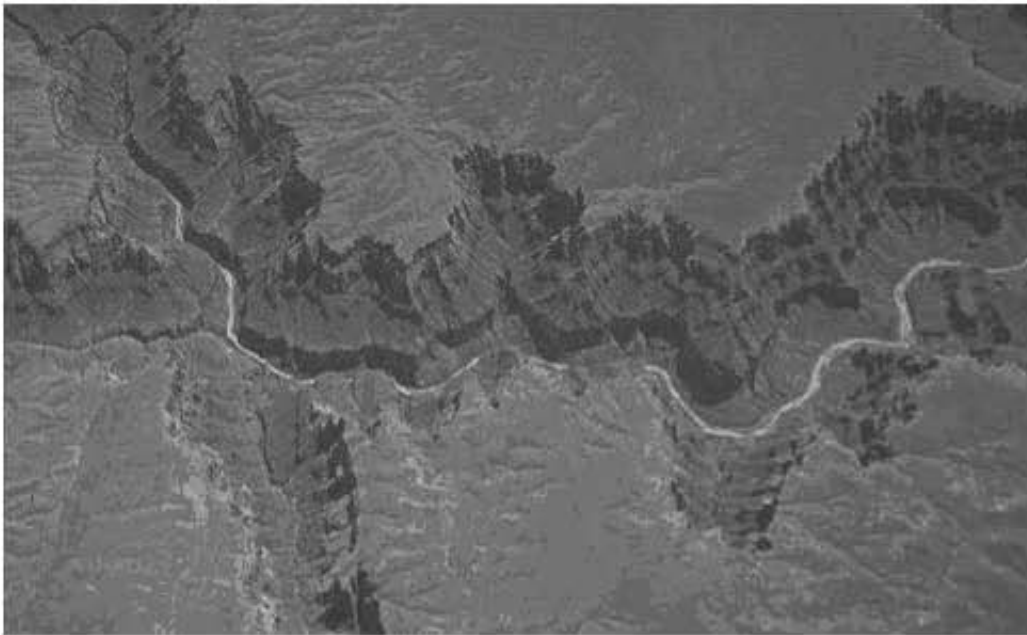
#### 1.4.4 Estanqueidad de los vasos

Una de las condiciones que debe reunir un embalse es su estanqueidad. En una CHAEB este aspecto es de suma importancia, ya que no se permite tener pérdidas de agua importantes debidas a filtraciones. Los criterios generales para el análisis de la estanqueidad de un embalse se basan en factores hidrogeológicos, litológicos y estructurales; entre ellos se incluyen (González de Vallejo, 2002):

- Las rocas duras y poco fracturadas (rocas ígneas, metamórficas, sedimentarias masivas, etc.) son en general favorables para la estanqueidad.
- Las rocas sedimentarias con alto contenido de arcilla (margas, lutitas, etc.) son muy favorables.
- Las rocas sedimentarias fracturadas, exceptuando las muy porosas, son igualmente favorables, ya que se supone que la filtración se produce a través de las fracturas y éstas se cierran con la profundidad.
- Las estructuras geológicas, como pliegues, pueden condicionar el flujo hacia el interior o exterior del embalse, por lo que deben analizarse detalladamente, así como su relación con las fallas y discontinuidades asociadas a dichos pliegues.
- Las fracturas importantes, diques, zonas de alteración, etc., pueden constituir vías de flujo preferente, siendo especialmente importantes en las rocas duras cristalinas y sedimentarias, donde es frecuente que las fallas pongan en contacto a rocas de muy diferente permeabilidad; el control hidrogeológico de estas fracturas y su relación estructural es determinante.
- Las formaciones menos favorables y donde son de esperar mayores problemas de filtración son las rocas calcáreas, calizas y dolomías, afectadas por procesos de karstificación.
- Igualmente, otras rocas porosas, como algunas areniscas, rocas volcánicas, depósitos cuaternarios y algunas estructuras sedimentarias como paleocauces, son desfavorables para la estanqueidad.
- En zonas de explotación minera también se pueden tener problemas de filtración, siendo las cuencas carboníferas las más problemáticas, al poder combinarse los problemas de filtración con los de subsidencia.

A partir de las anteriores consideraciones, se puede deducir que los sitios con rocas solubles o muy porosas se deben descartar, así como zonas donde se tengan discontinuidades importantes o que no estén rellenas de algún material que cierre las mismas. La impermeabilización de los vasos se logra con materiales como arcillas o lutitas, los que deben encontrarse cerca de los sitios donde vayan a ser utilizados.

## CAPÍTULO 2: ESTUDIOS PRELIMINARES



**Vista aérea del Gran Cañón, Colorado, E.U.**

## ESTUDIOS PRELIMINARES

**OBJETIVO:** conocer las características de la región de interés y describir los estudios que deben realizarse previa visita al sitio; esto se tratará en los subcapítulos 2.1 a 2.3, y en los subcapítulos 2.4 a 2.13 se plantean los estudios requeridos en la fase de prefactibilidad.

### 2.1 MAPAS GEOLÓGICOS REGIONALES

La geología regional de cualquier sitio es el producto de la historia geológica de la región. Por lo tanto, las estructuras tales como fallas, fracturas, pliegues o cualquier otra discontinuidad que enfrentará el ingeniero forman parte de un conjunto mucho más importante en el que se reflejan los procesos geológicos a que fue sometido el sitio aledaño a la obra. El conocimiento de los procesos geológicos es muy útil para formarse una idea clara del emplazamiento de la obra, ya que posiblemente señalará tendencias estructurales que no pueden ser conocidas por medio de la información recabada a nivel local.

En la mayor parte del mundo se han hecho estudios geológicos, que se han publicado en revistas científicas o marcado en mapas que pueden encontrarse en librerías locales, universidades u organismos gubernamentales de geología. Es de suma importancia que esta información sea recabada y estudiada en etapas tempranas del estudio de un proyecto.

En México, el Instituto de Geología de la UNAM es uno de los principales organismos que reúnen información geológica y la plasman en mapas que son accesibles a cualquier persona, con información que continuamente se revisa y de ser necesario, se corrige. La CFE, al ser una de las dependencias gubernamentales que más proyectan obras civiles en el país, cuenta también con una gran información que puede ser útil en el estudio de la geología regional, así como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), que tiene a la venta mapas detallados de gran parte de la República, no sólo de la geología, sino de edafología, uso de suelo, etc.; en la figura 2.1 se observa el mapa geológico de México.



**FIGURA 2.1.** Mapa geológico de la República Mexicana, (INEGI, 2004).

Otra fuente de información importante a nivel local puede ser proporcionada por gambusinos, mineros, trabajadores de canteras, contratistas y aficionados a la geología, ya que pueden proporcionar información sobre antiguas explotaciones de minas o canteras, manifestaciones excepcionales de aguas subterráneas y otros aspectos que pueden ser de interés.

## **2.2 INTERPRETACIÓN FOTOGEOLÓGICA E IMÁGENES DE SATÉLITE**

Muchas partes del mundo han sido fotografiadas desde el aire con diversos fines, militares u otros, y las fotografías aéreas de buena calidad pueden proporcionar información muy útil sobre características tanto estructurales como sobre algunos fenómenos que se producen en las profundidades. Las fallas y otros fenómenos lineales mayores son en general fáciles de identificar, pero un fotogeólogo hábil quizá podrá localizar también áreas de asentamientos, grietas de derrumbes de viejas minas o la manifestación en la superficie de cavernas de disolución que pueden haber modificado ligeramente el drenaje local, lo que se refleja en cambios poco visibles en el color o la distribución de la vegetación.

El examen estereoscópico de pares adyacentes de fotografías aéreas es útil en áreas de relieve topográfico accidentado, ya que es factible localizar viejos derrumbes y otros fenómenos de superficie de interés para el ingeniero. También se pueden restituir mapas con curvas de nivel del sitio a partir de fotografías aéreas.

## **2.3 MAPAS GEOTÉCNICOS**

Simultáneamente a la realización de los levantamientos topográficos debe iniciarse la campaña geológica. El encargado de estos estudios debe elaborar un mapa de geología estructural de la región y verificar si existen condiciones que no concuerden con los lineamientos generales, valiéndose de documentos tales como fotografías aéreas, planos topográficos y recorridos terrestres. En esta fase es necesario identificar las formaciones, localizar fallas, sistemas de fracturamiento, planos de contacto y plegamientos, observar el intemperismo de las rocas y la carsticidad en su caso. El informe respectivo, junto con los planos del levantamiento topográfico, conducen a tomar decisiones en cuanto a la localización de la tubería a presión, túneles, pozo de oscilación, etc.

Con base en los estudios anteriores, tanto los ingenieros geólogos como los ingenieros civiles encargados del proyecto discuten la campaña de exploración que habrá de realizarse para determinar las condiciones de la roca donde quedará desplantada toda la obra, así como verificar las características de la roca donde estarán localizados los vasos.

Con los datos proporcionados por las exploraciones y los recorridos superficiales, se construye el plano y las secciones transversales del levantamiento geológico. Los resultados se discuten con el ingeniero encargado del proyecto, y la conclusión puede ser: a) la aceptación del sitio estudiado con recomendaciones específicas sobre la cimentación de las estructuras, los métodos de excavación y la necesidad de anclas, inyectado o drenes; b) los problemas que se presentan son de tal magnitud que es aconsejable buscar otras alternativas; c) el sitio es inaceptable para la realización de la obra.

Los mapas elaborados con la información recabada de estudios geológicos regionales, se hacen en una escala entre 1:10,000 y 100,000. Pero para la elaboración de un mapa que

contenga información más específica, tal como la localización de bancos de materiales, excavaciones subterráneas, etc., la escala usual está entre 1:1,000 y 1:100, en los casos que exigen mucha precisión. Además, en los planos geotécnicos de detalle, así como en los registros y notas que los acompañan, se hace una clasificación del macizo rocoso.

En la figura 2.2 se presenta una columna estratigráfica correspondiente al estudio de factibilidad geológica realizado en el cerro El Topo para el PHAEB Monterrey, efectuado por la CFE.

	EDAD	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	UNIDADES	SMB	DESCRIPCIÓN
CUAT		2.8		Aluvión y depósito de bloques	Ual Qt	Fragmentos calcáreos mal consolidados
TERCIARIO	MIOCENO	13.7		Brecha sedimentaria	Tbs	Fragmentos angulosos de caliza, varían de 1 a 8 cm, excepcionalmente mayores de 1 m. Bien cementados y con permeabilidad secundaria. Predominan los fragmentos sobre la matriz limonosa roja.
		18.7				Composición parecida, sólo que predomina la matriz sobre los fragmentos. No está cementada y tiene permeabilidad primaria.
CRETÁCICO SUPERIOR	CAMPANIANO MULASRECHIANO	?		F. Méndez	Kam	Lutitas y mangas pardas, estratos delgados y laminares. Fácil de intemperizar y erosionar.
	CONIACIANO SANTONIANO	8.0		F. San Felipe	Ksrf	Caliza arcillosa gris amarillento en estratos delgados con alternancia de lutitas laminares muy deleznable. Se caracteriza por horizontes muy bentoníticos. Tiene un espesor de 8.0m muy alterado.
		30.0				
	TURONIANO	6.0		F. Agua Nueva	Ksan	Caliza arcillosa gris oscura, compacta, de estratificación delgada con intercalaciones de lutitas laminares carbonosas, tiene pinta diseminada y es muy fisil. Tiene un espesor de 6.0m intemperizado y alterado. En general es una roca moderadamente competente.
		32.5				
ALBIANO CENOMANIANO	19.0		Auros	Kia	Caliza gris oscura, dura y compacta, con estratificación media a masiva, fracturada sobre todo los primeros 19.0m. Contiene abundantes fósiles. Superficialmente se observa carsticidad y a profundidad se localizan algunas cavernas pequeñas.	
132.0						
CRET INFERIOR	APTIANO	24.0		F. La Peña ?	Kip	Calizas arcillosas amarillentas, compactas, con intercalaciones de lutitas calcáreas grises. Tienen estratificación delgada y laminar. RQD superior a 190%. No se cortó su base.

FIGURA 2.2. Columna estratigráfica cerro El Topo.<sup>9</sup>

## 2.4 DISPONIBILIDAD DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los materiales que pueden utilizarse en la construcción de una presa a distancias de acarreo económicamente aceptables, son un factor determinante en la selección del sitio donde ha de construirse. Se puede dar el caso en que se tienen todas las características favorables tales como muy baja permeabilidad en los vasos, desniveles excelentes, un macizo rocoso estable, pero sin materiales para la construcción de la o las cortinas, en cuyo caso el

proyecto habrá de abandonarse por cuestiones económicas atribuibles a la falta de dichos agregados.

En esta sección se darán algunas indicaciones generales útiles en la identificación de bancos de préstamo de los diferentes materiales con que es posible construir una presa. El conocimiento de las condiciones geológicas generales del área inmediata a los sitios donde se hará la construcción, permitirá anticipar los tipos de materiales con mayor probabilidad de aparición en la zona de interés.

### ***Materiales finos***

Los suelos compuestos de proporciones diversas de arena, limo y arcilla, se encuentran generalmente bajo las siguientes condiciones geológicas:

**i:** Como producto de la parte superficial intemperizada de masas rocosas de origen ígneo, tales como granitos, andesitas, riolitas y dioritas.

**ii:** En las tobas volcánicas.

**iii:** En algunos depósitos de tipo aluvial, como antiguos cauces de ríos o en llanuras de inundación periódica.

Aunque la mayoría de los materiales que a la vista pueden identificarse como finos se utilizan en la construcción de los bordos para contención de agua, no serán útiles los materiales arcillosos suaves, debido a los problemas de agrietamientos y deformaciones que pueden inducirse en el bordo, y los materiales que contengan un porcentaje mayor de 85% de limos o arenas, presentarán problemas de tubificación, licuación y filtraciones excesivas si no se coloca en el bordo una protección similar a la utilizada en los enrocamientos. De esta manera, los materiales idóneos son aquellos que contienen similares porcentajes de arena, arcilla y limo. Una manera rápida de establecer en campo las características y porcentajes de cada material es realizando las pruebas de resistencia al rompimiento, reacción al agitado y consistencia en el límite líquido (tenacidad).

### ***Materiales gruesos***

La identificación visual de este tipo de materiales es inmediata y es usual que se encuentren con un cierto porcentaje de arenas, en las siguientes condiciones geológico-fisiográficas:

**i:** En lechos de ríos, principalmente jóvenes.

**ii:** En formaciones geológicas de aglomerados y conglomerados.

Para bancos de este tipo de materiales es necesario estimar a la vista la distribución de tamaños de los componentes y el estado de compacidad y cementación que presentan, para establecer el uso que se les dará y la maquinaria a emplearse en su explotación.



## Materiales pétreos

Estos materiales también son fáciles de identificar a simple vista y suelen hallarse bajo las siguientes condiciones:

i: Los boleos y fragmentos redondeados se encuentran en los cauces de cañadas que bajan de la serranía con fuertes pendientes y, con menor densidad que en éstos, en los lechos de los ríos jóvenes. La explotación puede hacerse de forma individual, lo que aumenta los costos. Se deberá hacer un registro de los tamaños de roca para determinar el empleo que tendrán.

ii: En masas rocosas fracturadas y escasamente intemperizadas se podrán obtener fragmentos de los tamaños que permita la frecuencia de la fracturación.

Para la localización de los bancos son útiles las fotografías aéreas de la zona explorada.

En la fase de estudios preliminares será necesario identificar el Índice de Plasticidad y el contenido de partículas menores a dos micras para los bancos de materiales finos para juzgar la conveniencia relativa de un banco sobre otro, respecto a su susceptibilidad de tubificación y erosión, de acuerdo con las indicaciones señaladas en la siguiente figura.

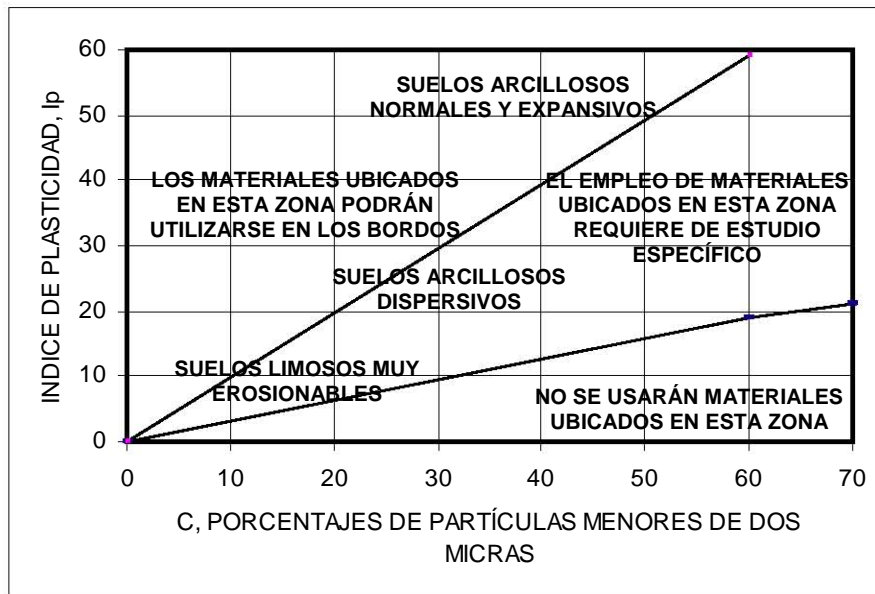


FIGURA 2.3. Actividad de los suelos constitutivos de presas homogéneas que han sufrido tubificación.<sup>4</sup>

## 2.5 RESISTENCIA, ESTABILIDAD Y PERMEABILIDAD

### Resistencia

La resistencia se define como el esfuerzo que la roca puede soportar para unas ciertas condiciones de deformación. La resistencia pico,  $\sigma_p$ , es el esfuerzo máximo que puede alcanzar. Se produce para una cierta deformación llamada deformación de pico. La resistencia residual,  $\sigma_r$ , es el valor a que cae la resistencia de algunas rocas para

deformaciones elevadas. Se produce después de sobrepasar la resistencia pico. La determinación del comportamiento de la roca es de difícil cálculo y de importantes consecuencias prácticas.

En condiciones naturales, la resistencia depende de las propiedades intrínsecas de la roca, cohesión y ángulo de fricción, y de factores externos como la magnitud de los esfuerzos a que será sometida, los ciclos de carga y descarga o la presencia de agua. Por este motivo, la resistencia no es un valor único intrínseco de la roca, lo que hace imprescindible conocer su valor y rangos de variación para determinadas condiciones de los materiales rocosos.

La resistencia a compresión es la propiedad más característica y frecuentemente medida en una matriz rocosa, por la facilidad en la obtención de testigos y de su ensayo en laboratorio. Por el contrario, en un macizo rocoso su determinación no es directa, debiendo realizarse por métodos empíricos.

Para una determinada carga, los esfuerzos superan la resistencia de la roca y se da lugar a la rotura de la misma.

La rotura es el fenómeno que se produce cuando la roca no puede soportar las cargas impuestas, alcanzando un valor máximo correspondiente a la resistencia de pico del material. Aunque en general se supone que la rotura ocurre o se inicia al alcanzarse la resistencia de pico, esto es una simplificación que no siempre se cumple. Tampoco la rotura de la roca tiene que coincidir forzosamente con el inicio de la generación de los planos de fractura. La fractura es la formación de planos de separación en la roca, rompiéndose los enlaces de las partículas para crear nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y permanecen únicamente las friccionantes.

En función de la resistencia de la roca y de las relaciones entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones correspondientes la rotura puede responder a diferentes modelos: rotura frágil (instantánea y violenta) o rotura dúctil (progresiva).

A escala de macizo rocoso fracturado, la rotura puede ocurrir a través de la matriz rocosa o a favor de las discontinuidades preexistentes, siendo también posible la creación de planos de rotura mixtos.

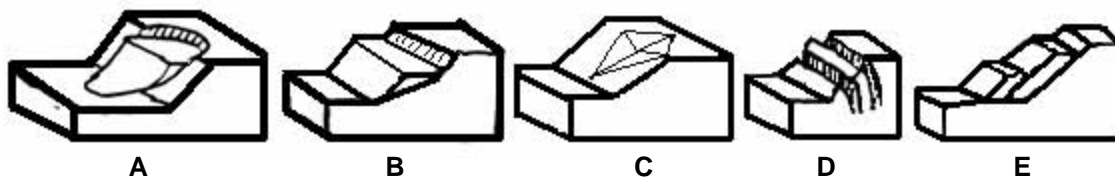
### *Estabilidad*

Comprende los problemas en los que está involucrada la resistencia al corte de los materiales de la cimentación o los empotramientos. Algunos de ellos afectan directamente a la presa y otros al equilibrio de las laderas en el embalse. A partir del estudio geológico se conocen las rocas existentes, la disposición de las grietas y la presencia de materiales que pueden ser causa de algún problema especial. Con esta información, es posible prever ciertos fenómenos que ocurrirán al crear el embalse y tener una idea aproximada de sus consecuencias sobre las obras que se proyectan. Pero tales datos no son suficientes. Es necesario determinar la resistencia al corte de los materiales en cuestión, para evaluar si la estructura o la ladera están en peligro de fallar. Depende del tipo de formación y a veces de pequeños detalles descubiertos en ella, que deba recurrirse a métodos de laboratorio o a pruebas de campo, para encontrar las propiedades que interesan en dichos cálculos.

En suelos, comúnmente la resistencia al corte se determina mediante las pruebas de compresión simple y triaxial realizadas en laboratorio. En suelos granulares, además de conocer la resistencia, se debe conocer la relación de vacíos *in situ*, ya que tanto la

resistencia como la permeabilidad y compresibilidad de estos materiales dependen de este parámetro, principalmente.

El análisis de la estabilidad de masas de roca presenta dificultades de diversa índole. Importa el tipo de roca, la disposición del fracturamiento, los rellenos de las grietas, la alteración sufrida por el intemperismo, etc. Dicho de otra manera, para investigar la estabilidad de un macizo, es necesario conocer sus debilidades o defectos. Como ejemplo, tenemos que si se encuentra una serie de caliza con intercalaciones de lutita, el ingeniero debe concentrar su atención en estas últimas, al investigar la resistencia al corte y observar la geometría en relación con los esfuerzos que puede introducir la estructura que proyecta. De antemano, se supone que la lutita tenderá a alterarse por efecto de los cambios en su contenido de humedad debido a la fluctuación en el nivel de aguas freáticas que se producirán por efecto del llenado y vaciado del embalse alternos. Cuando se trata de rocas ígneas, lo importante es conocer el fracturamiento que presenta la masa. Se deben registrar la frecuencia de fallas, tipo de relleno si existe, orientación, grado de alteración de las superficies, síntomas de circulación del agua, etc. Posteriormente se determinan las fracturas producidas por fallas, plegamiento, flujo plástico (creep), antiguos deslizamientos, o bien, las de tensión por relajación de esfuerzos.



**FIGURA 2.4.** Fallas de un talud de roca: de izq. a der.: A. circular, B. planar, C. en cuña, D. por volcamiento, E. por pandeo y pateo. (Hoek and Bray, Rock Slope Engineering.)

### *Permeabilidad*

Esta característica es de gran interés en el análisis de alternativas para el emplazamiento de un embalse, pues toda fuga de agua es una pérdida indeseable. Algunas veces deben admitirse ciertas pérdidas por este concepto, si bien en una central de este tipo, se debe tener la certeza de que esto no ocasionará un mal funcionamiento de la planta.

En suelos cohesivos, la permeabilidad es tan baja que, salvo en ciertas arcillas residuales, los problemas de filtración tienen poco interés práctico. El coeficiente de permeabilidad varía de  $10^{-5}$  a  $10^{-9}$  cm/seg. En materiales granulares el flujo de agua plantea dos cuestiones importantes: a) la estimación del gasto de agua, y b) la posibilidad de tubificación o erosión interna del suelo. La primera se resuelve con pruebas de permeabilidad, preferentemente de campo. La segunda se puede estudiar en laboratorio, con muestras inalteradas que se someten a la acción de gradientes hidráulicos crecientes, observando el acarreo de partículas. Esta prueba tiene particular aplicación en casos de limos y arenas finas.

En la mayoría de cimentaciones o empotramientos sobre rocas, la permeabilidad es consecuencia de su fracturamiento o disolución; sin embargo, ciertas areniscas, tobas y conglomerados tienen una permeabilidad intrínseca no despreciable.

## **2.6 ESTABILIDAD DE LAS LADERAS DEL EMBALSE**

El llenado de un embalse supone los siguientes efectos:

- Imposición de una carga en las laderas y fondo del valle equivalente a la altura de carga en cada punto del vaso.
- Elevación del nivel freático en las laderas del embalse.
- Cambios en las condiciones hidrogeológicas de los materiales afectados.
- Oscilación de los niveles freáticos en las laderas del embalse según las condiciones de explotación.

Como consecuencia de lo anterior, se producen cambios tensionales cuyas consecuencias pueden dar lugar a inestabilidad en las laderas del embalse. El caso más desfavorable que se puede presentar es un rápido descenso del nivel del agua, lo que provoca que se pierda el equilibrio al tener el material elevadas presiones intersticiales que no se disipan con la misma velocidad del vaciado del embalse. Las situaciones características son las siguientes:

- a) Situación previa al llenado del embalse.
- b) Situación una vez llenado el embalse lentamente y establecido el nivel freático correspondiente en la ladera.
- c) Situación de vaciado rápido del embalse en materiales de baja permeabilidad.

Al llenarse el embalse, las laderas adoptan nuevas condiciones hidráulicas, y se establecen los niveles freáticos de acuerdo a la altura del agua embalsada y las características hidrogeológicas de los materiales.

La resistencia del terreno se verá afectada principalmente por la generación de presiones intersticiales. Pero el agua embalsada, por otro lado, ejerce sobre la superficie de las laderas una fuerza estabilizadora que se opone al deslizamiento.

El descenso del nivel del agua hace que se pierda este equilibrio, quedando el terreno con elevadas presiones de poro que generan inestabilidad, por lo que habrá de realizarse un estudio de estabilidad de taludes, de preferencia con la mayor cantidad de métodos existentes. En la actualidad existen paquetes de computadora que permiten realizar una cantidad importante de cálculos en un tiempo reducido, y encuentran el factor de seguridad mínimo para condiciones diversas. Uno de estos paquetes es el "Geoslope", el cual tiene una versión estudiantil libre.

## **2.7 CONDICIONES SISMOTECTÓNICAS**

Uno de los aspectos básicos para el estudio y evaluación de la peligrosidad sísmica es la caracterización de las fuentes de los terremotos. La tectónica de placas explica la distribución de la sismicidad a escala global, permitiendo distinguir entre zonas sísmicamente activas, que coinciden con límites de placas litosféricas, y zonas relativamente estables en el interior de las placas. Dentro de las áreas sísmicas, las fuentes de los terremotos superficiales son estructuras definidas, las fallas, cuya actividad tectónica es responsable de la liberación de energía durante el terremoto.

Para explicar el terremoto de San Francisco en 1906, se elaboró el modelo de rebote elástico, en el que se considera que los dos bloques separados por una falla activa<sup>1</sup> tienden a desplazarse relativamente uno del otro, aunque la falla permanece bloqueada hasta que se vence un umbral de resistencia a la rotura y ésta rompe en una extensión más o menos importante.

Por otra parte, en zonas continentales del interior de las placas, consideradas estables, han ocurrido algunos terremotos que han sorprendido por sus magnitudes. Terremotos como el de Killari (India) ocurrido en 1993 en una zona aparentemente asísmica se han podido correlacionar con el reactivamiento del movimiento en fallas.

En consecuencia, aparte de llegar a una evaluación cuantitativa y adecuada de la peligrosidad sísmica se necesita una caracterización de las fallas potencialmente activas en la región de interés.

Como ejemplo se muestra un “nudo tectónico” en la figura 2.5, formado por tres estructuras: las fallas Galeana y San Marcos, y la fractura Torreón-Monterrey.

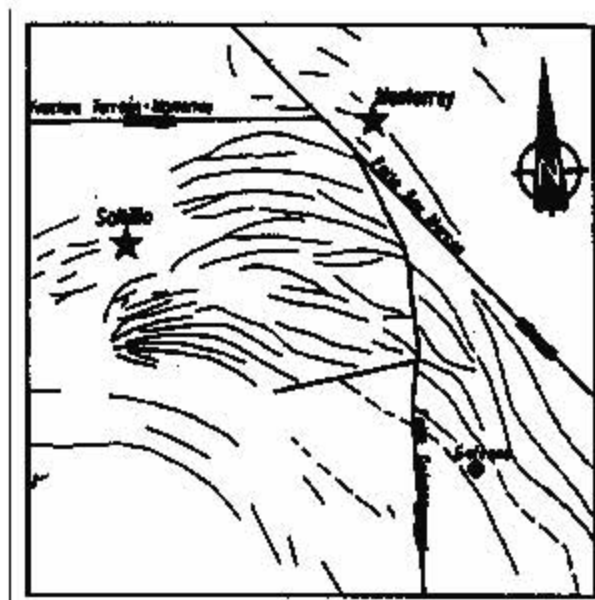


FIGURA 2.5. Lineamientos estructurales importantes cercanos a Monterrey.<sup>14</sup>

## 2.8 CARSTICIDAD

Los desplazamientos verticales que se presentan en las estructuras algunas de las veces son provocados por los hundimientos de cavidades subterráneas, hundimientos superficiales en rocas o suelos, o subsidencias o descensos lentos y paulatinos de la superficie del relleno.

En el primer caso, los movimientos son por colapso del techo de cavidades subterráneas, más o menos profundas, al alcanzarse una situación límite de las rocas suprayacentes, sometidas a tensiones que no pueden soportar.

Estas cavidades están asociadas a materiales cársticos o solubles, como las rocas carbonatadas y evaporíticas, donde los procesos de disolución crean huecos que, al alcanzar

<sup>1</sup> Se considera falla activa a aquella que tuvo su último movimiento hace 10,000 años para la construcción de grandes presas, y para instalaciones nucleares, el periodo es de 500,000 años.<sup>3</sup>

determinadas dimensiones, generan estados de desequilibrio e inestabilidad, dando lugar a la rotura de la bóveda o techo de la cavidad; si éste es poco resistente, se hundirá la superficie del terreno. La variación constante del nivel freático en materiales cársticos puede dar lugar a reajustes tensionales que provocan hundimientos.

El resultado en superficie de los hundimientos cársticos son las dolinas, aunque pueden generarse también por disolución de las rocas en superficie de forma paulatina o por subsidencia de los suelos blandos que recubren formaciones cársticas.

Los materiales evaporíticos (sales y yesos) mucho más blandos que los carbonatados, presentan mayor capacidad de disolución, y los movimientos de reajuste de los materiales a los huecos son continuos, a diferencia de los hundimientos bruscos de los materiales carbonatados. Las cavidades en yeso y sal no alcanzan profundidades mayores a los 200 m.

Los planos geológicos que proporciona el INEGI son útiles para identificar materiales susceptibles a presentar carsticidad, además de que se tienen identificadas las dolinas, siendo esto un buen antecedente para la etapa de prefactibilidad de una CHAEB. En los proyectos que se están analizando en el país, se encontró que algunos de los vasos superiores quedarían precisamente sobre dolinas; debido a esto, es necesario realizar estudios de campo para garantizar la estabilidad de los embalses, o en su caso, impermeabilizar el piso y las laderas.

## 2.9 HIDROGEOLOGÍA DEL EMBALSE

La hidrogeología de los vasos de almacenamiento es un aspecto que debe tratarse en las etapas tempranas de estudio. La capacidad para almacenar y transmitir el agua por parte de un acuífero debe ser cuantificada para evaluar las formaciones desde el punto de vista hidrogeológico. Por ello, se asocian a las formaciones cuatro parámetros básicos en cuanto a su comportamiento respecto al agua que puedan contener y transmitir. Porosidad y coeficiente de almacenamiento, permeabilidad y transmisividad, son los cuatro parámetros básicos, dependientes dos a dos, cuyos conceptos deben fijarse para definir las características de los acuíferos.

### *Porosidad*

La porosidad es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni la potencia de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza.

Según el tipo de formación, los poros pueden ser debidos a espacios intergranulares, en las formaciones detríticas, o a grietas y fisuras, en el caso de rocas fisuradas o cársticas; el concepto de porosidad puede asociarse a unas y otras.

La porosidad se evalúa de la siguiente forma:

$$n = \frac{\text{volumen de vacíos}}{\text{volumen total}}$$

### *Coficiente de almacenamiento*

Este coeficiente representa la capacidad para liberar agua de un acuífero. Se define como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura igual a la del acuífero, cuando desciende un metro el nivel piezométrico.

### *Permeabilidad*

La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica. Dentro de este concepto pueden definirse otros dos:

- La permeabilidad ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite, denominada permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica, representada por el coeficiente de permeabilidad  $k$ .
- La denominada permeabilidad intrínseca,  $K$ , que es solo dependiente de las características del medio permeable.

### *Transmisividad*

La transmisividad  $T$  es el parámetro definido para evaluar la capacidad de transmitir agua de los acuíferos, teniendo en cuenta no sólo la textura del acuífero y las características del fluido, sino también las características estructurales o geométricas. Se define como el producto de la conductividad hidráulica  $k$  y el espesor del acuífero  $b$ :

$$T = kb$$

Acuíferos muy permeables, pero de pequeño espesor, pueden no ser aptos para una eficaz transmisión del agua debido a su bajo espesor y, consecuentemente, baja transmisividad.

Para la evaluación hidrogeológica se recurre a mapas hidrogeológicos, topográficos, fotografías aéreas, datos de pozos y sondeos, informes hidrogeológicos, y mapas de riesgo de inundaciones.

## **2.10 LITOLOGÍA**

La Litología es la parte de la Geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas.

La composición mineralógica permite clasificar litológicamente la roca. Los minerales más comunes que forman las rocas se pueden identificar a nivel de muestra con una lupa, si las dimensiones del mineral lo permiten. La identificación detallada de los minerales requiere un estudio petrográfico mediante lámina delgada, lo que se tratará en el capítulo 3.

Una vez descritos los minerales, se nombra y clasifica la roca. El sistema más recomendable se basa en clasificaciones geológicas enfocadas a usos geotécnicos. En la tabla 2.1 se muestra la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

El tamaño de grano hace referencia a las dimensiones medias de los minerales o fragmentos de roca que componen la matriz rocosa. La estimación del tamaño de grano se realiza normalmente con una regla o con la ayuda de comparadores de mano. El tamaño de





las partículas minerales que componen la roca puede ser homogéneo (rocas equigranulares) o presentar variaciones importantes (heterogranulares)

El color de una roca depende de los minerales que la componen y se puede describir de forma semejante al de los suelos, dan un color principal seguido de uno secundario e indicando, por último, la intensidad que presenta. Existen cartas de colores que se emplean para la comparación, evitando así cualquier grado de subjetividad en la descripción.

La dureza es una propiedad directamente relacionada con la resistencia, cuya descripción es cualitativa. Generalmente se adoptan como criterios la densidad y la resistencia de la roca. Para evaluar la dureza de los materiales, se emplea la escala de Mohs, que asigna un valor de 1 para el mineral más blando (talco) y un valor de 10 para el más duro (diamante)

## **2.11 FRACTURAMIENTO**

Las discontinuidades están presentes en la roca y afectan la resistencia, permeabilidad y durabilidad de la masa. Es importante evaluar la geometría, naturaleza, estado y condición de las discontinuidades, porque ellas definen la fábrica estructural del macizo rocoso. Además de su génesis, la influencia en el comportamiento del macizo exige evaluar el origen de los rellenos, la cantidad de agua y revestimientos en las paredes por materiales solubles, la abertura, rugosidad y persistencia de las discontinuidades, y el número de familias.

Las discontinuidades pueden tener su origen de varias formas, como son:

Genéticas o primarias. Son discontinuidades asociadas a estructuras de flujo y a fenómenos de retracción térmica en las rocas ígneas, a la foliación en algunas rocas metamórficas y a la estratificación en las sedimentarias. Son contemporáneas con la formación de la roca.

Termoquímicas. Estas discontinuidades, de carácter secundario, pueden ocurrir después de formada la roca por causa del medio externo, como la termofracción por gradiente térmico, gelifracción por agua-hielo, halifracción por sales y argilofracción por arcillas.

Gravitacionales y tectónicas. Son discontinuidades secundarias asociadas a esfuerzos gravitatorios como grietas de tensión, o a esfuerzos tectónicos donde se incluyen diaclasas, fallas y estructuras de placas tectónicas.

En la siguiente tabla se muestran los tipos más comunes de discontinuidades en macizos rocosos:

Origen	Roca	Clase	Mecanismo
Genético	Ígneas	Estructura de flujo	Contactos entre coladas de lavas sucesivas
		Estructura de retracción	Grietas de retracción por enfriamiento
	Metamórficas	Foliación	Por gradientes térmicos, de presión y anatexia
	Sedimentarias	Estratificación	Contactos entre eventos de deposición
Físico-químico	Todas	Termofracturas	Ciclos de calentamiento-enfriamiento o humedecimiento-secado
		Halifracturas	Expansión de sales y arcillas en fracturas
		Gelifracturas	Ciclos de congelamiento y fusión de agua
Gravedad	Todas	Relajación	Pérdida de presión de sepultura y esfuerzos de tracción
		Corte	Concentración de esfuerzos horizontales en valles
Tectónico	Todas	Estructuras de placa	Bordes constructivos, pasivos y destructivos
		Fallas	Rupturas con desplazamientos por esfuerzos de compresión, tracción y corte
		Diaclasas	Rupturas por esfuerzos tectónicos, pero sin desplazamiento de bloques
		Fracturas de pliegues	Radiales en la zona de tracción y de corte en la parte interna de la charnela
Biológico	Todas	Acción de las raíces	Penetración y crecimiento de las raíces de los árboles

**Tabla 2.2.** Tipos más comunes de discontinuidades

Una familia de fracturas es un grupo de ellas con igual orientación y varias familias presentes en un macizo, intersecándose, se denominan sistema de fracturas del macizo.

Las fracturas pueden ser abiertas o cerradas y estar cementadas o no. También pueden ser paralelas a los planos de estratificación (rocas sedimentarias) o de clivaje (rocas metamórficas).

Por regla general un macizo tiene tres familias de fracturas asociadas a esfuerzos y cuando hay más de tres es porque existe superposición de esfuerzos.

La orientación es la posición espacial y se da con el rumbo y echado (ver figura 2.13) de la superficie de discontinuidad. Es importante ver la actitud de los bloques y fracturas para efectos de estabilidad. Estos datos se miden empleando la brújula con clinómetro.

Es aconsejable medir un número suficiente de orientaciones de discontinuidades para definir adecuadamente cada familia. El número de medidas depende de la dimensión de la zona estudiada, de la aleatoriedad de las orientaciones de los planos y del detalle del análisis. La representación gráfica de la orientación de las diferentes familias de discontinuidades puede realizarse mediante proyección estereográfica, diagramas de rosetas, bloques diagrama y como símbolos en mapas geológicos.

- Espaciamiento. Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia. Debe advertirse que el espaciamiento aparente, el que muestra en superficie la roca, por regla general es mayor que el real. Se utiliza el promedio. La medida del espaciamiento se realiza con una cinta métrica; se describe según los términos de la tabla 2.3:

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	< 20 mm
Muy junto	20 – 60 mm
Junto	60 – 200 mm
Moderadamente junto	200 – 600 mm
Separado	600 – 2000 mm
Muy separado	2000 – 6000 mm
Extremadamente separado	> 6000 mm

**Tabla 2.3.** Espaciamientos de discontinuidades

- Continuidad. La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente.

La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso. La continuidad se describe según la tabla 2.4.

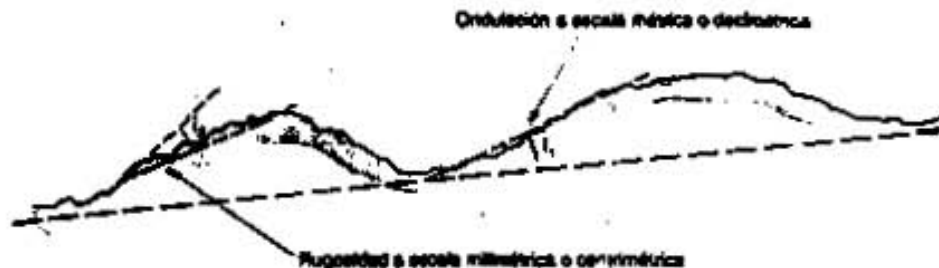
Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1 – 3 m
Continuidad media	3 – 10 m
Alta continuidad	10 – 20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

**Tabla 2.4** Continuidad de planos de fracturamiento

- Rugosidad. Se alude a la rugosidad de la superficie y a la ondulación de la discontinuidad, pues ambas afectan la resistencia del macizo rocoso. Una alta rugosidad aumenta la resistencia a la fricción. La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos.

El término de rugosidad se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos, definidas en ocasiones como de 1° y 2° orden respectivamente. La descripción de la rugosidad requiere dos escalas de observación (figura 2.6):

- Escala decimétrica y métrica para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.
- Escala milimétrica y centimétrica para la rugosidad o irregularidad: superficiales pulidas, lisas o rugosas.



**FIGURA 2.6.** Ondulación y rugosidad de una superficie de discontinuidad.

- Persistencia. Es la longitud de la traza de una discontinuidad en un afloramiento (se trabaja estadísticamente y con criterios probabilísticos como el espaciamiento). Cuando hay persistencia se garantiza el flujo de agua a través de la masa.

- Resistencia de las paredes de la discontinuidad. Generalmente es la resistencia a la compresión no confinada, pues es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. La resistencia aumenta con la presencia de dientes de roca en la discontinuidad.

- Abertura. Es la distancia perpendicular entre las paredes de las distancias de las diaclasas cuando estas no tienen relleno (sólo agua o aire). Hay diaclasas cerradas. Este parámetro puede ser variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso: mientras que en superficie la abertura puede ser alta, esta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. Su medida se realiza directamente con una regla graduada en mm. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en la abertura. La descripción se realiza según la siguiente terminología:

Abertura	Descripción
< 0.1 mm	Muy cerrada
0.1 – 0.25 mm	Cerrada
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierta
0.5 – 2.5 mm	Abierta
2.5 – 10 mm	Moderadamente ancha
> 10 mm	Ancha
1 – 10 cm	Muy ancha
10 – 100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

**Tabla 2.5.** Criterio para clasificar las aberturas de discontinuidades en macizos rocosos

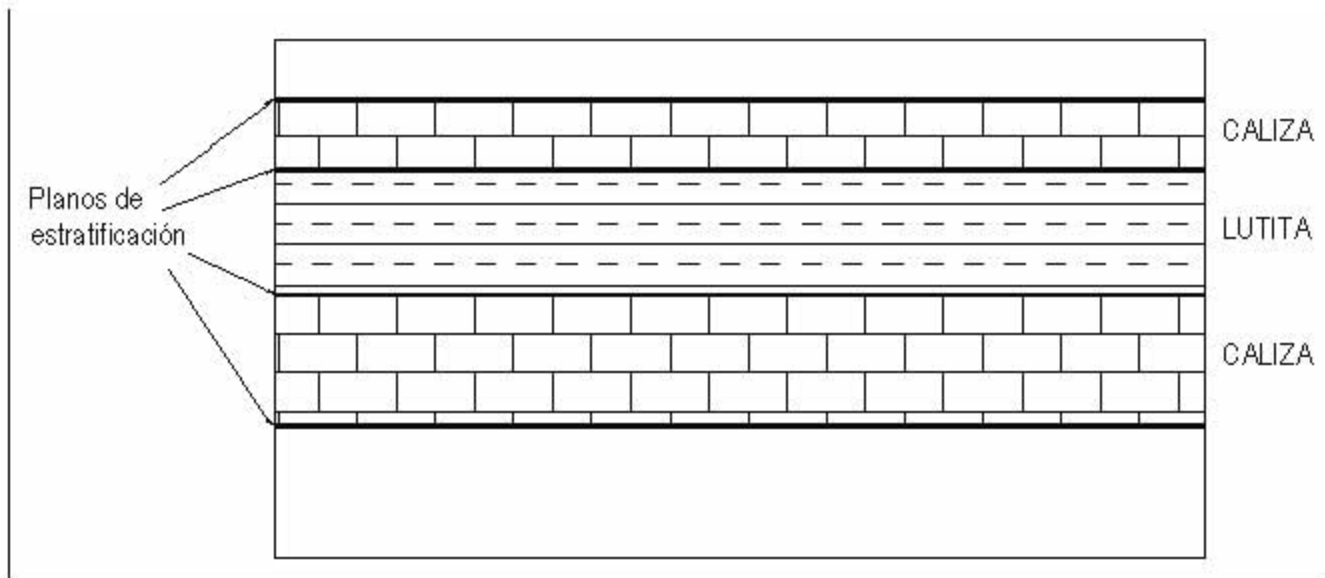
- Relleno. Alude al material entre las paredes de la discontinuidad, casi siempre más blando que el macizo rocoso. Las características principales del relleno que deben describirse en el afloramiento son: su naturaleza, espesor o anchura, resistencia al corte y permeabilidad (los dos últimos parámetros de forma cualitativa o indirecta)
- Flujo. Agua presente en la discontinuidad que se encuentra libre o en movimiento. Se describe por el caudal y debe evaluarse si el agua brota o no con presión.
- Número de familias presentes. Es indicativo del grado de fracturamiento del macizo y depende de la dirección y tipo de esfuerzos. El menor número de familias en un macizo es tres; también las familias presentan características distintivas, no solamente en dirección y espaciamiento sino también en condiciones de relleno, caudal e incluso edad y tipo de esfuerzos que las origina.
- Tamaño de bloques. El que se cuantifica con algunas metodologías específicas. Deben identificarse además los bloques críticos: aquellos que tienen tamaños finitos y posibilidad de desprenderse.

## 2.1 ESTRATIFICACIÓN

Es la propiedad que tienen las rocas sedimentarias de disponerse en cuerpos tabulares de cierta extensión formados sucesivamente por el depósito y consolidación de sedimentos. Las rocas ígneas presentan pseudoestratificación, principalmente en los volcanes compuestos que están formados por derrames de lava y piroclastos que pueden superponerse de forma alternada. El volcán Popocatépetl es un ejemplo.

### *Plano de estratificación*

Es el plano de separación física que divide a un estrato de otro. Los estratos de las rocas sedimentarias están separados de los planos de estratificación a lo largo de los cuales las rocas tienden a separarse. Por lo general el espesor y tipo de roca sedimentaria en cada estrato refleja la diversidad de condiciones que prevalecía cuando se depositaron los sedimentos; cada plano de estratificación marca la terminación de un depósito de sedimentos y el principio de otros.



**FIGURA 2.7.** Planos de estratificación

### *Disposición de los estratos*

Los estratos no siempre se encuentran en posición horizontal, estos pueden estar inclinados con respecto a la superficie, que sirve de referencia. Para indicar la disposición del estrato hay que determinar su rumbo y echado.

### *Tipos de pliegues*



**FIGURA 2.8.** Pliegue anticlinal: El plano axial viene dado por el plano de simetría del anticlinal, y el eje anticlinal es la línea de intersección del plano axial con la charnela.



**FIGURA 2.9.** Pliegue sinclinal: Los elementos son los mismos, con la diferencia que el manteo de los flancos es convergente.



**FIGURA 2.10.** Pliegue monoclinal: Es el que presenta una simple inflexión de los estratos; con cierta frecuencia, estos pliegues degeneran en fallas al producirse un estiramiento y fractura de la rama monoclinal del pliegue



**FIGURA 2.11** Pliegue isoclinal: Cuando una serie de pliegues sucesivos llegan a presentar sus flancos paralelos, originan una serie isoclinal continua, de estratos con manteo uniforme.

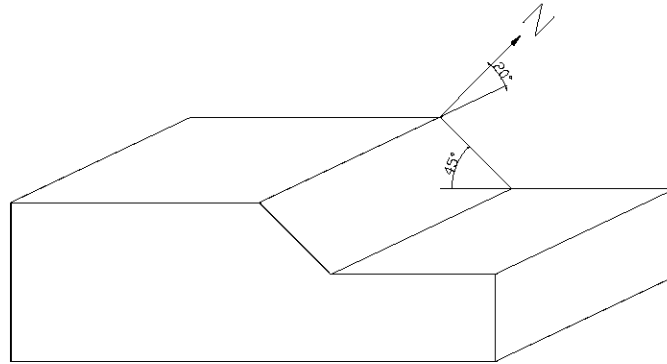


**FIGURA 2.12.** Volcados o acostados: Cuando los pliegues son mas o menos asimétricos, con los planos axiales diversamente inclinados



### *Rumbo y echado*

Para la caracterización y análisis de las diferentes estructuras existen dos conceptos muy útiles que son el *rumbo* y *echado*. El rumbo es el ángulo que se forma entre la estructura (talud, pliegue, falla, fractura, etc.) y el norte; echado es el ángulo que forma el plano de la estructura con la horizontal y se mide por el ángulo que forma la línea de máxima pendiente trazada sobre la estructura, con su proyección sobre el plano horizontal.



**FIGURA 2.13.** Talud con rumbo de 20°NE y echado de 45°SW (N20°E/45°SW)

## **2.2 FOLIACIÓN**

A temperatura y presión elevadas, se produce una recristalización completa, que da lugar a esquistos o gneiss, rocas en las que el alineamiento de las laminillas de mica produce la foliación, es decir, una textura laminar que se caracteriza por el aspecto bandeado de la roca. En los esquistos, los minerales de color claro (cuarzo y feldespato sobre todo) están distribuidos homogéneamente entre las micas de color oscuro; el gneiss, por el contrario, exhibe bandas de color características. Entre otros minerales formados por recristalización metamórfica, los silicatos de aluminio como la andalucita, la silimanita y la cianita son lo bastante característicos como para ser considerados diagnósticos.

**CAPÍTULO 3: ESTUDIOS *IN SITU*, EXPLORACIÓN MEDIANTE SONDEOS Y GALERÍAS**



Cuadrilla de trabajadores operando una máquina Long Year 44

## **ESTUDIOS *IN SITU*, EXPLORACIÓN MEDIANTE SONDEOS Y GALERÍAS**

**OBJETIVO:** establecer los estudios que se llevan a cabo en la fase de factibilidad, dando parámetros que permitan tomar decisiones en cuanto a tratamientos de mejora del terreno y diseño de la obra civil.

### **3.1 LITOLOGÍA**

Al iniciar la exploración, es posible que no exista la información adecuada del macizo a la profundidad donde se tienen que realizar las obras subterráneas, por lo que la roca que se manifiesta en la superficie es la que tiene que dar la máxima información sobre los tipos de roca y las características estructurales del macizo.

Los lechos de los arroyos generalmente proporcionan mucha información por medio de afloramientos rocosos, sobre todo los arroyos de montaña, con escurrimiento rápido, donde el agua cortó el material superficial para dejar expuesta la masa rocosa. Cuando hay pocos afloramientos o cuando se piensa que las manifestaciones existentes han sido alteradas seriamente, se excavan pozos para observar la litología. Se pueden excavar varios metros con explosivos, siempre que se tenga el cuidado de no alterar las características de la roca con las vibraciones producidas por las detonaciones. A veces es suficiente limpiar la superficie con agua o aire a presión para dejar expuesta la roca en el levantamiento estructural. Aparte de servir para la identificación de las rocas se deben usar los afloramientos para medir el rumbo y echado de los fenómenos estructurales como la estratificación.

Las libretas de campo son comúnmente utilizadas para la clasificación en campo, aunque una grabadora de video es útil también, ya que proporciona elementos adicionales para ser revisados en gabinete. Es muy importante pasar los datos de campo a planos o a otras formas permanentes a intervalos determinados y de preferencia diariamente. Esto permitirá la verificación de anomalías aparentes cuando todavía se tiene acceso a los afloramientos, así como la eliminación de información equivocada que puede resultar peligrosa para el proyecto.

Como el levantamiento de campo es realizado por un ingeniero geólogo y los datos los usará un ingeniero civil en una etapa posterior para el diseño, es muy importante que exista una comunicación amplia entre ambos. También es importante que la información sea legible y entendible por otros geólogos e ingenieros que se interesen en otros aspectos del proyecto y que puedan verse involucrados en reuniones ocasionales sobre problemas geotécnicos. La representación gráfica o sobre maquetas de los resultados debe realizarse de manera limpia y clara<sup>1</sup>. Se realizan cortes como el que se muestra en la figura 3.1, los cuales se van mejorando conforme avanza el estudio y la construcción de la central.

<sup>1</sup> Excavaciones subterráneas en rocas. E. Hoek. E.T. Brown

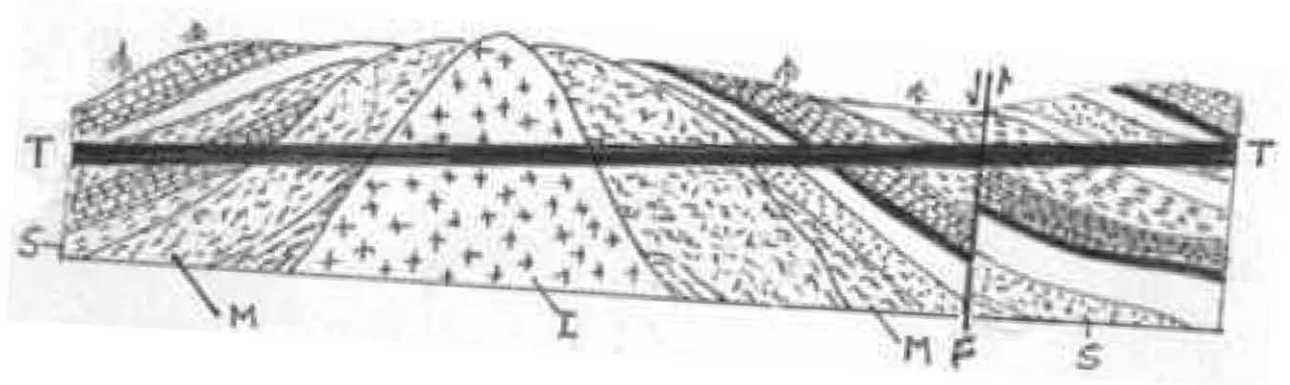


Fig. 3.1. Túnel en un macizo afectado por una intrusión. Originalmente el macizo era sedimentario y ahora posee aureola de metamorfismo. (T túnel, F falla, I roca ígnea, M roca metamórfica y S roca sedimentaria).

En la fig. 3.1 las capas sedimentarias están levantadas hacia la intrusión ígnea. El metamorfismo se da sobre las rocas sedimentarias por efectos del magma ascendente. El contacto entre las rocas metamórficas y la intrusión está fallado. Existe una falla tectónica, además. Un túnel atravesando este macizo encontrará comportamientos diferentes en las rocas: habrá comportamiento plástico en las metamórficas y elástico en las dos zonas de falla; serán rocas duras las ígneas y metamórficas y blandas las sedimentarias, habrá discontinuidades de retracción en las ígneas y de estratificación en las sedimentarias entre estas, los comportamientos varían sustancialmente.

### 3.2 CLASIFICACIÓN

La caracterización del macizo rocoso es una tarea de observación, mediciones y ensayos para obtener parámetros cuantitativos útiles al diseño ingenieril. Este proceso además se complementa a lo largo de todas las etapas del proyecto, desde el diseño hasta su construcción y operación. Según la fase de diseño se requiere establecer un nivel mínimo de caracterización. El primero es con base en observaciones geológicas, el segundo nivel exige prospecciones geofísicas y el nivel final perforaciones exploratorias, medidas y ensayos geotécnicos.

Los parámetros geotécnicos fundamentales son la resistencia al corte, la deformabilidad, la permeabilidad y el estado original de esfuerzos, tanto para macizos en rocas duras como en rocas blandas. En las segundas la durabilidad de las rocas y su potencial de expansión y fluencia deben ser propiedades de primer orden.

En el caso de cimentaciones los principales problemas para una estructura en roca blanda son asentamientos diferenciales, rebote, falla a lo largo del contacto estructura-roca, las altas presiones de poros, las fugas excesivas y rara vez la falla por capacidad portante del macizo.

En los taludes la altura condiciona el tipo de caracterización geotécnica, como también lo hace la resistencia de la roca intacta y la geometría de las discontinuidades. Si es relevante la resistencia al corte, la deformabilidad puede tener interés por la inducción de fracturas de tensión en la corona, donde el agua introducida genera situaciones de inestabilidad que no existían.

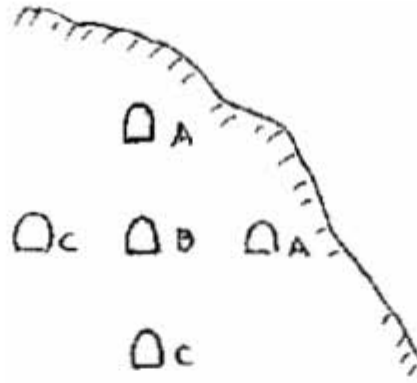
Las rocas pueden ser duras o blandas y las fallas de los macizos se pueden presentar por zonas de debilidad o de discontinuidad estructural. Las rocas blandas fallan a través del cuerpo de la masa rocosa y también a través de sus defectos estructurales.

### *Calidad del macizo*

Se considera que un suelo o roca es blando o duro, según su resistencia a la compresión esté en los siguientes rangos:

Suelo blando menos de	4 Kg/cm <sup>2</sup>
Suelo duro entre	4 - 10 Kg/cm <sup>2</sup>
Roca blanda entre	10 - 200 Kg/cm <sup>2</sup>
Roca dura más de	200 Kg/cm <sup>2</sup>

Las rocas blandas son aquellas que pueden fallar a través de material intacto a los niveles de esfuerzos existentes que se pueden dar en el área de influencia de una excavación, sin que tenga sentido un valor numérico para definir la resistencia de dichas rocas, máximo si se tiene en cuenta que los macizos de roca más dura pueden fallar y fallan en las excavaciones más profundas. El comportamiento de una galería puede ser dúctil, adecuado o frágil, como se muestra en la fig.3.2, cuando se consideran profundidades del orden de 100, 200 y 300 metros respectivamente.



**Figura 3.2** Profundidad de una galería. A. Comportamiento frágil, B. comportamiento adecuado, y C. comportamiento dúctil. Según Álvaro Correa A, curso de mecánica de rocas. U. Nal. De Colombia.

En A hay relajamiento de esfuerzos y el bloque superior puede caer, en B el confinamiento es suficiente y la región es óptima y en C se corre peligro de implosión cuando se cierre el túnel si la roca fluye por plasticidad.

Si la densidad de la roca es  $2,5 \text{ ton/m}^3$ , la carga de roca a 300 m de profundidad ( $P_z = \gamma H$ ) será  $750 \text{ ton/m}^2$  y a 600 m  $1500 \text{ ton/m}^2$ .

Experimentalmente se sabe que para las excavaciones la presión litostática  $P_z$  dividida por el esfuerzo de ruptura  $s_c$  debe ser superior a 0,2, límite por debajo del cual las rocas fallan. En los casos anteriores  $P_z / 0,2 > s_c$ , da los siguientes valores.

Para  $H = 300 \text{ m}$  de la relación anterior  $750 / 0,2 > 3750 \text{ ton/m}^2$

Para  $H = 600 \text{ m}$  de la relación anterior  $1500 / 0,2 > 7500 \text{ ton/m}^2$

Algunos autores consideran el límite entre roca blanda o dura la resistencia inconfiada de  $3750 \text{ ton/m}^2$ , e incluso  $7500 \text{ ton/m}^2$  o más, si los esfuerzos horizontales son mayores que los verticales aunque las profundidades sean menores que las indicadas. Para los casos anteriores, taludes en rocas de esta resistencia, con alturas de 500 metros podrían presentar falla parcial a través de la masa de la roca intacta. En proyectos de ingeniería profundos los macizos con esta resistencia pueden fallar a través del material intacto bajo ciertas consideraciones extremas de profundidad al comportarse de manera dúctil como se ilustró con el ejemplo del túnel.

## Propiedades de las rocas

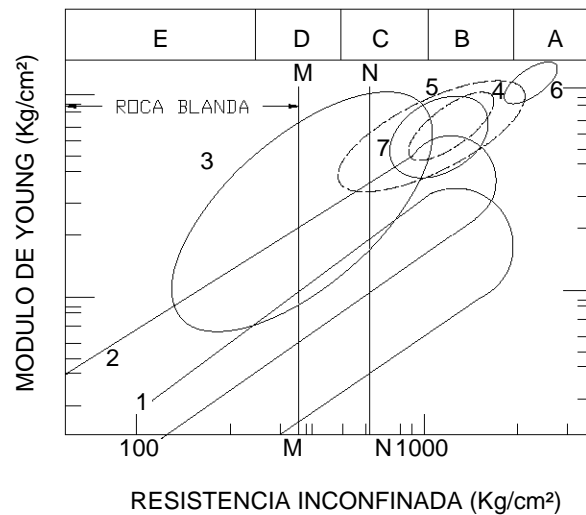


Figura 3.3. Clasificación ingenieril de roca intacta según Deere. E. Resistencia muy baja, D resistencia baja, C. resistencia media, B. resistencia alta, A. resistencia muy alta. 1. Roca arcillosa, 2. areniscas, 3. esquistos de foliación fina, 4. granitos, 5. calizas, 6. cuarcitas, 7. gneises, 8. esquistos de foliación gruesa. M. 375 Kg/cm<sup>2</sup>, N. 700 Kg/cm<sup>2</sup>.<sup>3</sup>

De la clasificación hecha por Deere que se muestra en la figura 3.3, se tiene lo siguiente:

- Rocas ígneas. Son muy resistentes, isotrópicas, rígidas, densas y de textura entrabada. Su inconveniente se da por presencia de materiales alterables y diaclasamiento.
- Rocas ígneas plutónicas. Tienen minerales resistentes, compactos, se da una falla escalonada de minerales porque son diferentes.
- Rocas ígneas volcánicas. Muestran heterogeneidad de minerales; hay falla en poros que afectan la roca, la porosidad le da plasticidad a la masa que si es de rocas masivas resulta poco porosa.
- Rocas sedimentarias. Tienen resistencia media a baja son ortotrópicas, poco rígidas, dúctiles, porosas y presentan textura cementada-laminada. Su inconveniente es la ortotropía que hace difíciles los cálculos de estabilidad y comportamiento del macizo.

- En las rocas sedimentarias la resistencia depende del grado de cementación y de su densidad. Ella aumenta cuando los granos son finos; si hay disolución en la masa hay porosidad. Los planos de estratificación son zonas de debilidad.

- Las rocas metamórficas. Se caracterizan por una resistencia de media a alta, su ortotropía, tenacidad, textura y baja porosidad. Hay rigidez en el sentido paralelo y plasticidad en el perpendicular, con relación a los planos de clivaje. Su ortotropía dificulta los cálculos. Resultan elásticas por la cristalización de la masa. Son densas por el empaquetamiento. Si hay minerales laminados hay debilidad. Si hay esquistosidad hay zonas de debilidad. Los gneises son como los granitos aunque el bandeamiento les da debilidad.

- Macizos en roca blanda. Los macizos de roca blanda están constituidos por materiales generalmente sedimentarios de grano fino, como argilitas, lodolitas, limolitas, tobas y margas, y también areniscas o conglomerados pobremente cementados, o rocas metamórficas con orientación esquistosa desfavorable (filitas, esquistos), cuyo comportamiento geomecánico está controlado por la roca intacta y también por fracturas, diaclasas y fallas.

Los macizos de roca meteorizada también pueden ser considerados como masa de roca blanda cuyas discontinuidades son rellenos de materiales tipo suelo.

Las obras más difíciles de caracterizar son las excavaciones subterráneas, puesto que el escenario está a distancia y escondido por una gran cubierta de materiales rocosos. Entre los problemas a resolver en el diseño de túneles que han de conducir agua a presión están el de la estabilidad de las paredes sin agua y con ella, el grosor del refuerzo, la permeabilidad del macizo y la estabilidad de las laderas vecinas en caso de fuga de agua hacia sus taludes.

La caracterización apropiada de los macizos rocosos, además de ser la base para el diseño de las obras, contribuye a la optimización del método constructivo, da vía al mejoramiento del macizo (anclajes, inyecciones, drenaje) y permite la programación de observaciones durante el funcionamiento de las obras.

La sistemática para la descripción de los afloramientos de macizos rocosos se resume de la siguiente manera:

La descripción general del afloramiento debe incluir la identificación, condiciones y características generales del afloramiento y la de cada uno de sus componentes: rocas, suelos, zonas con agua, discontinuidades singulares, etc.

La división en zonas más o menos homogéneas se realiza a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales. El número de zonas que se establezca y la extensión de las mismas dependerá del grado de heterogeneidad de los materiales y estructuras que formen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento y del grado de detalle y finalidad de la investigación. Se deben describir las características generales de cada zona.



La descripción de cada zona se lleva a cabo por separado y detalladamente, y deberá ser lo más objetiva y clara posible, utilizando terminología estandarizada, de manera que distintos observadores lleguen a la misma descripción, evitando que puedan aparecer diferencias en la interpretación de las observaciones o medidas realizadas en una misma zona. A lo largo de esta fase se describen las características y propiedades físicas y mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades; los aspectos y factores a describir son los del Cuadro 3.1.

Las descripciones se efectúan de forma cualitativa y, siempre que sea posible, cuantitativa. A tal efecto existen tablas, escalas, índices y valores de referencia que se utilizan para cuantificar las diferentes propiedades y características del macizo o de sus elementos. La cuantificación de los parámetros es útil para establecer valores objetivos con los que trabajar, pero además es necesaria para su introducción en las clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos.

Dado el gran número de parámetros a valorar, para la toma sistemática de los datos resulta muy útil utilizar estadillos como el que se presenta en la figura 3.4, que permiten anotar claramente las observaciones y medidas realizadas. En el caso de afloramientos extensos deberán tomarse varios puntos o estaciones de medida en cada zona, en cada una de las cuales se realiza la toma sistemática de datos. Cuanto mayor sea el número de medidas y estaciones realizadas, mayor será la representatividad de los resultados obtenidos en cuanto a caracterización global del macizo rocoso.

La descripción de los parámetros del macizo rocoso se realiza a partir de los datos recogidos en cada estación; se establecerán los parámetros referentes al número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando su importancia relativa, tamaño y forma de los bloques que conforman el macizo, grado de fracturación, etc., así como otros factores que influyen en el comportamiento, como el grado de meteorización y las propiedades hidrogeológicas.

La caracterización global del macizo rocoso constituye la fase final del proceso descriptivo, y debe proporcionar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo en su conjunto. A partir de estos resultados se aplican las clasificaciones geomecánicas, que proporcionan información sobre la calidad y resistencia del macizo, así como datos cuantitativos para su aplicación a diferentes fines constructivos (túneles, taludes, etc.). Esta última fase requiere una mayor experiencia, y debe integrar el conocimiento de la geología regional y del emplazamiento. Los resultados de la caracterización geomecánica de afloramientos rocosos pueden presentarse en forma de cartografías de detalle y en perfiles geológico-geotécnicos.

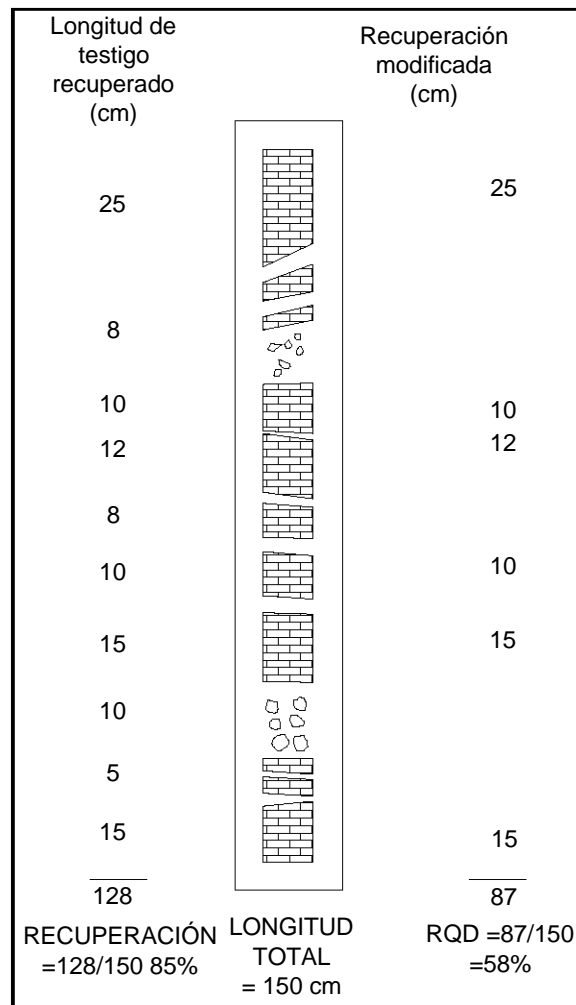
<b>Ámbito de estudio</b>	<b>Características o propiedad</b>	<b>Método</b>	<b>Clasificación</b>
Matriz rocosa	Identificación	Observaciones de visu y con lupa	Clasificación geológica y geotécnica
	Meteorización	Observaciones de visu	Índices estándar
	Resistencia	Índices y ensayos de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
Discontinuidades	Orientación	Medida directa con brújula de geólogo	
	Espaciado	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Continuidad		
	Rugosidad	Observaciones y medidas de campo	Comparación con perfiles estándar
	Resistencia de las paredes	Martillo Shmidt. Índices de campo	Clasificaciones empíricas de resistencia
	Abertura	Observaciones y medidas de campo	Índices estándar
	Relleno		
Filtraciones			
Macizo rocoso	Número de familias de discontinuidades	Medidas de campo	Índices y clasificaciones estándar
	Tamaño de bloque		
	Intensidad de fracturación		
	Grado de meteorización	Observaciones de campo	Clasificaciones estándar

Cuadro 3.1. Características y propiedades de campo para la caracterización del macizo rocoso



### 3.3 ÍNDICE DE CALIDAD DE LAS ROCAS (RQD)

El índice de calidad (RQD) se basa en la recuperación modificada de testigo, que a su vez depende indirectamente del número de fracturas y del grado de debilitamiento o alteración del macizo rocoso, según se puede observar por los testigos extraídos de un sondeo. En lugar de contar las fracturas, se obtiene una medida indirecta sumando la longitud total de testigo pero considerando únicamente aquellos trozos de testigo de longitud igual o superior a 10cm, en estado sano y compacto.



**Figura 3.5** La recuperación modificada de testigo como índice de calidad de una roca.

En la figura 3.5 se muestra un ejemplo correspondiente a un sondeo de 150cm. En este caso particular la recuperación total de testigo fue de 128cm, con un porcentaje de testigo recuperado del 85 %. Con la modificación, sólo se tienen en

cuenta 87cm, siendo el RQD del 58 %. Se ha visto que el RQD es un índice más sensible y consistente de la calidad general de una roca que el porcentaje de recuperación total.

Si el testigo se ha roto por el manejo o por el proceso de perforación (por ejemplo, cuando se aprecian superficies de fractura recientes y regulares en lugar de diaclasas naturales), se juntan los trozos partidos y se cuentan como una pieza única, siempre que alcancen la longitud requerida de 10cm. Es necesario un cierto criterio en el caso de las rocas sedimentarias o rocas metamórficas estratificadas, no siendo tan exacto el método en estos casos como en las rocas ígneas, calizas en estratificación gruesa, areniscas, etc. Sin embargo, el método se ha aplicado con éxito incluso en pizarras, aunque es necesario medir los testigos inmediatamente después de extraerlos del sondeo y antes de que comience el desmenuzamiento y disgregación al aire.

Evidentemente este método es muy rígido para la roca cuando la recuperación es escasa, si bien una escasa recuperación suele indicar una pobre calidad de la roca. Pero esto no siempre es cierto, ya que un equipo de perforación o una técnica deficientes pueden también dar lugar a una recuperación escasa. Por esta razón, se requiere una batería de sondeo de doble tubo de diámetro mínimo NX (54mm), siendo fundamental una adecuada vigilancia de la perforación.

Por simple que parezca el procedimiento, se ha encontrado que existe una correlación bastante buena entre los valores numéricos del RQD y la calidad general de la roca a efectos prácticos de ingeniería. Esta correlación se da en la tabla 3.1.

<b>INDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (RQD) %</b>	<b>CALIDAD</b>
0-25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Regular
75-90	Buena
90-100	Excelente

**TABLA 3.1.** Relación entre el RQD y la calidad de la roca.<sup>2</sup>

### **3.4 FRACTURAMIENTO**

En los reconocimientos de campo de los macizos rocosos deben ser registradas todas las familias presentes, y evaluar su grado de importancia relativa. Este grado puede expresarse mediante la asignación de números correlativos para las familias de mayor a menor importancia. Así, la familia principal (con mayor continuidad, menor espaciado, mayor abertura, etc.) sería la familia número uno.

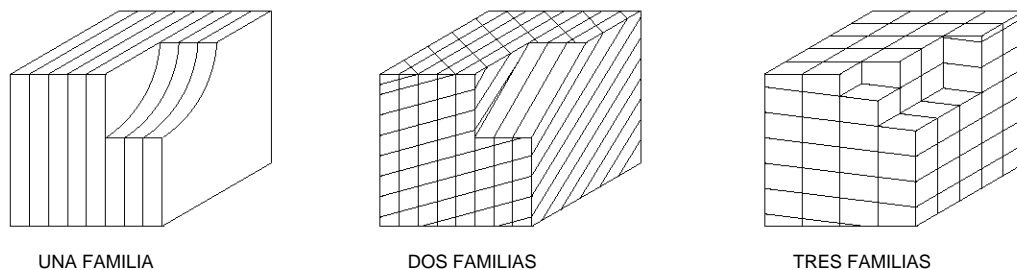
La orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica o la construcción de diagramas de rosetas con los datos de las orientaciones medidas para cada discontinuidad. Actualmente existen programas informáticos para realizar estos trabajos de una forma rápida y exacta.

El macizo puede clasificarse por el número de familias según la tabla 3.2, variando entre macizos rocosos masivos o con una única familia de discontinuidades, por ejemplo un macizo rocoso granítico, y macizos con cuatro o más familias de discontinuidades, como puede ser un afloramiento de pizarras plegado e intensamente fracturado. La presencia de tres familias principales de discontinuidades ortogonales entre sí es frecuente en los macizos rocosos sedimentarios, siendo una de las familias la estratificación.

Las familias de discontinuidades se pueden representar gráficamente mediante bloques diagrama como los de la figura 3.6, permitiendo así la visualización espacial de su orientación relativa: del tamaño y forma de los bloques de matriz rocosa.

Tipo de macizo rocoso	Número de familias
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	Una familia de discontinuidades
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales
IV	Dos familias de discontinuidades
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales
VI	Tres familias de discontinuidades
VII	Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades
IX	Brechado

**Tabla 3.2.** Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades.<sup>3</sup>



**Figura 3.6.** Representación del número de familias mediante bloques diagramas.<sup>3</sup>

### Tamaño de bloque y grado de fracturación

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las siguientes formas:

- Mediante el índice de tamaño de bloque  $I_b$ , que representa las dimensiones medias de los bloques tipo medidos en el afloramiento. Por ejemplo, en el caso de una roca sedimentaria con planos de estratificación y con dos familias de discontinuidades perpendiculares entre sí, el índice  $I_b$  vendría definido por:

$$I_b = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3}$$

siendo  $e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$  los valores medios del espaciado de las tres familias de discontinuidades.

- Mediante el parámetro  $J_v$  que representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen ( $1\text{m}^3$ ) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de  $J_v$  se suele determinar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias (o en su defecto realizando la corrección necesaria con respecto a la dirección aparente de medida):

$$J_v = \sum \frac{d}{l}$$

siendo  $d$  el número de discontinuidades y  $l$  la longitud donde se contaron éstas. Por ejemplo, para un macizo con tres familias de discontinuidades ( $J_{v1}$ ,  $J_{v2}$ ,  $J_{v3}$ ):

$$J = (NoJ_1 / L_1) + (NoJ_2 / L_2) + (NoJ_3 / L_3)$$

La longitud a medir dependerá del espaciado de cada familia, variando normalmente entre 5 y 10 metros. De forma más rápida, aunque menos exacta, también puede estimarse el valor de  $J_v$ , contando el número total de discontinuidades que interceptan una longitud  $L$  en cualquier dirección de interés (cortando al mayor número posible de planos), correspondiendo este valor a la frecuencia de discontinuidades,  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{d}{L(m)}$$

El valor de  $J_v$  se relaciona con el tamaño de los bloques según la tabla 3.3; los valores mayores de 60 corresponden a un macizo rocoso brechado.

La tabla 3.4 incluye una clasificación del macizo rocoso en función de la forma y tamaño del bloque y de la intensidad de fracturación.

Descripción	$J_v$ (discontinuidades/m <sup>3</sup> )
Bloques muy grandes	<1
Bloques grandes	1-3
Bloques de tamaño medio	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	>30

**Tabla 3.3.** Descripción del tamaño de bloque en función del número de discontinuidades.<sup>3</sup>

Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o con espaciado muy grande
II	Cúbico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con dos dimensiones considerablemente mayores que la otra
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado

**Tabla 3.4.** Clasificación de macizos rocosos en función del tamaño y forma de los bloques.

### 3.5 PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

Las pruebas de permeabilidad de laboratorio son útiles cuando la estructura que se construye está formada por un material que puede considerarse homogéneo, isótropo, o anisótropo, como en el caso del corazón impermeable de una cortina, construido con material procedente de un banco de préstamo. En cambio, en las formaciones naturales, generalmente compuestas por mantos distintos, con variaciones importantes tanto en la disposición de los mismos como en las características de los materiales, es difícil estudiar el escurrimiento a partir de un número limitado de ensayos sobre muestras inalteradas. En mantos de arena y grava es casi imposible obtener especímenes inalterados. En estos casos es necesario recurrir a las pruebas de campo.



El tipo de prueba de permeabilidad útil en cada caso particular depende de numerosos factores, tales como tipo de material, localización del nivel freático y homogeneidad o heterogeneidad de los distintos estratos del suelo, en cuanto a permeabilidad se refiere.

### 3.5.1 Prueba LeFranc

La prueba se ejecuta en una perforación expresamente hecha para el efecto, en que su extremo interior está dotada de una cámara filtrante.

La prueba podrá hacerse a flujo constante, sea por bombeo o por inyección de un gasto constante; o en flujo variable por ascenso o descenso de la superficie del agua dentro de la perforación. En ambos casos es recomendable que la carga de prueba se limite a valores del orden de 5 a 10m, como máximo.

Para el primer caso, si se denomina  $H$  la diferencia de carga total correspondiente al gasto  $Q$ , la permeabilidad estará dada por:

$$K = C \frac{Q}{H}$$

En donde  $C$  es un coeficiente que depende de las dimensiones y forma de la cámara de filtrante.

$K$  en m/seg.

$C$  en  $1/m = m^{-1}$

$Q$  en  $m^3/\text{seg}$ .

$H$  en metros

Con objeto de comprobar que las dimensiones son normales se hacen ensayos con gastos mayores y menores que el de prueba y los valores  $Q$  y  $H$  se llevan a una gráfica a escala natural, en donde, si el ensayo es correcto y el flujo laminar, deberán quedar alineados a lo largo de una recta pasando por el origen.

Cuando el tramo de prueba se encuentre en la cercanía al fondo impermeable o a la superficie del manto freático, al coeficiente  $C$  debe hacerse una corrección.

Cuando el terreno sea poco permeable, podrá usarse el caso de flujo variable, cuyos elementos son:

$D$  = diámetro de la tubería en metros

$L$  = longitud de la cámara filtrante en metros.

$H_0$  = distancia del punto medio de la cámara filtrante al manto impermeable

$H_1$  = carga en el instante  $T_1$

$H_2$  = carga en el instante  $T_2$

$A$  = área efectiva de la sección transversal de la tubería de prueba  $m^2$

$T_1$  y  $T_2$  tiempos correspondientes a  $H_1$  y  $H_2$

$C$  tiene el mismo significado que para el caso 1

Para este caso:

$$K = 2.3CA \frac{\log\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{T_1 - T_2}$$

En el caso de las pruebas de flujo constante, ya sea por bombeo o por inyección de agua, en las que se calcula, con los datos de campo, el gasto  $Q$  en l/s y la carga  $H$  en m, con el fin de graficar el resultado de la prueba, se utilizan estos mismos datos para calcular el coeficiente de permeabilidad por medio de la fórmula siguiente, convirtiendo a  $Q$  en  $m^3/s$ .

$$K = C \frac{Q}{H}, \text{ en m/s}$$

En la que  $C$  es un coeficiente que depende de la forma de la cámara filtrante. Para encontrar el valor de  $C$  en diferentes diámetros, en función del diámetro de la perforación y la longitud de la cámara filtrante se utilizan las siguientes fórmulas:

$$C = \frac{\log\left[\frac{1}{D} + \sqrt{\frac{L}{D^2} + 1}\right]}{4\pi\left(\frac{L}{D}\right)}$$

$$C = 0.366 \frac{\log\left[\left(1 + \sqrt{L^2 + D^2}\right)/D\right]}{DL}$$

En estas fórmulas el valor de  $C$  esta dado en  $m^{-1}$ .

Para el caso de las pruebas de flujo variable, con ascenso de la superficie de agua dentro de la perforación, en las que se van obteniendo las profundidades  $h_1$  y  $h_2$  con que va variando el espejo del agua cada determinado tiempo de observación  $\Delta T$ , el coeficiente de permeabilidad esta dado por la fórmula

$$K = 2.3CA \frac{\log\left(\frac{H_1}{H_2}\right)}{T_1 - T_2}$$

En la que  $C$  se obtiene igual que en el caso de las pruebas de flujo constante teniendo el mismo significado.

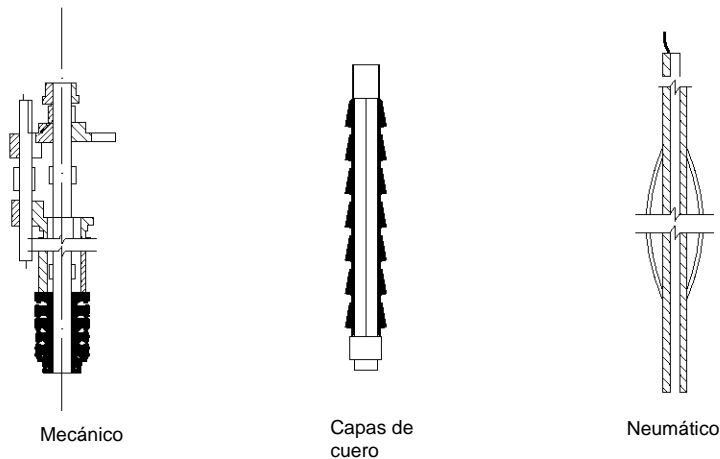
Una permeabilidad de  $1.0 \times 10^{-6}$  o mayor puede considerar que el material es impermeable. La permeabilidad resultante de  $1.0 \times 10^{-5}$ , como poco permeable; de  $1.0 \times 10^{-4}$  como permeable y entre  $1.0 \times 10^{-3}$  y  $1.0 \times 10^{-2}$  como altamente permeable.

### 3.5.2 Prueba Lugeón

La permeabilidad a través de agrietamientos o fisuras en la roca, se mide por medio de las pruebas Lugeón efectuadas en el sitio de la perforación. La dimensión de los bloques de roca impermeable, separados por fracturas es despreciable, si se compara con la permeabilidad a través de ellas o de fisuras.

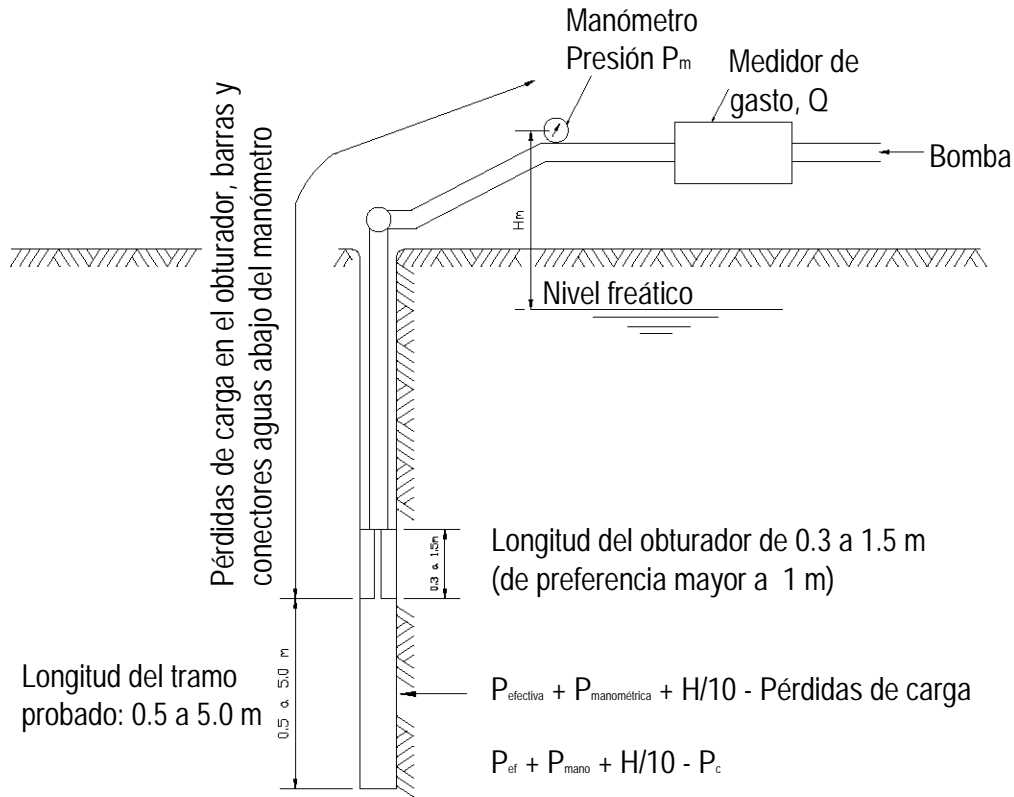
Para conocer la permeabilidad de una formación de rocas compactas fracturadas, es necesario que existan estas para facilitar la cuantificación del gasto que se infiltra al efectuar la prueba de permeabilidad en la perforación que se está haciendo.

Los ensayos Lugeón son análogos a los Lefranc. Lo mismo que estos, se ejecutan según avanza la perforación, se hace en rocas de baja permeabilidad en pequeño volumen pero más o menos fisuradas; es necesario ejercer presiones relativamente grandes para inyectar el agua en las fisuras. Supongamos una perforación invadida hasta una cierta profundidad. A partir de ella se perforan unos 5m. A continuación se fija un obturador (fig. 3.7) en la parte superior de este tramo virgen y se inyecta agua a presión con una bomba. Un manómetro colocado en la boca del pozo, un contador de agua y una válvula de descarga, permiten medir los caudales inyectados a una presión dada.



**Figura 3.7.** Diferentes tipos de obturadores.

En general, se mide durante cinco o diez minutos el caudal inyectando a una presión constante. Después se trabaja con una presión mayor. La gama de presiones a emplear depende del estado de fisuración, pero cuando menos se emplean tres o cuatro valores que se volverán a utilizar cuando se haya alcanzado la presión máxima. Esta raramente es mayor a 10 kg/cm<sup>2</sup>, ya que existe un límite a causa de la presencia del obturador y de la potencia de las bombas. Por otra parte, se corre el riesgo de producir una fracturación artificial y trastornos del terreno que falsearían los resultados. En la figura 3.8 se muestra el arreglo típico de una prueba Lugeón.



**Figura 3.8.** Prueba Lugeón.

La comparación de los resultados obtenidos con presiones crecientes y decrecientes es muy instructiva en lo que concierne al comportamiento del terreno. A menudo se comprueba que cuando las presiones disminuyen, los caudales son más elevados que cuando aumentan a consecuencia del lavado de las fisuras.

Mediante este procedimiento se obtiene gráfica o numéricamente el gasto de absorción expresado en unidades Lugeón con los datos de gasto en l/min/m y presión de inyectado, o sea la línea que une el origen de la gráfica con el punto gasto – presión de la prueba y prolongada hasta cortar la paralela al eje de las abscisas, con ordenada igual a  $10 \text{ k/cm}^2$ .

### 3.6 ENSAYES GEOFÍSICOS

La Geofísica estudia la tierra en su composición y dinámica, sobre la base de medidas de tipo físico que normalmente se realizan desde la superficie del planeta. Cuando este estudio tiene que ver con áreas relativamente pequeñas y profundidades que no sobrepasen unos pocos kilómetros, para obtener un fin económico inmediato, se habla de geofísica aplicada, y el conjunto de métodos para obtener ese fin constituyen la prospección geofísica. Se pueden inferir informaciones sobre la composición del subsuelo mediante algún parámetro físico medido en superficie, que puede ser la velocidad de una onda mecánica, o

variaciones de un campo gravitacional producidas por diferencias de densidad, o la intensidad de una corriente asociada a la mayor o menor facilidad de propagación de las cargas eléctricas.

Los métodos ofrecen una forma de obtener información detallada acerca de las condiciones del suelo y rocas del subsuelo. Esta capacidad de caracterizar rápidamente las condiciones del subsuelo sin perturbar el sitio ofrece el beneficio de costos más bajos y menos riesgo, dando mejor entendimiento general de las condiciones complejas del sitio. Es necesario a menudo utilizar más de un método para lograr obtener la información deseada.

Para poder aplicar un método geofísico en una prospección, es necesario que se presenten dos condiciones importantes:

- que existan contrastes significativos, anomalías que se pueden detectar y medir.
- que estos contrastes se puedan correlacionar con la geología del subsuelo.

Al realizar estudios geofísicos en un vaso o en el sitio donde se pretende construir la cortina de una presa y correlacionarlos con la exploración directa, podemos obtener información adicional muy valiosa, tal como la existencia de discontinuidades, los espesores de los diferentes materiales, cavidades y oquedades que no siempre se detectan con los métodos directos.

Entre los más usuales se enumeran los siguientes:

### 3.6.1 Sondeos geoelectricos

Los métodos geoelectricos pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- En los métodos inductivos se trabaja con corrientes inducidas en el subsuelo a partir de frecuencias relativamente altas (entre 100 Hz y 1 MHz).
- En el caso de los métodos conductivos, se introduce en el subsuelo una corriente continua o de baja frecuencia (hasta unos 15 Hz), mediante electrodos.

Los métodos eléctricos de prospección geofísica comprenden variedad de técnicas que emplean tanto fuentes naturales como artificiales. Los métodos eléctricos más usuales son las *resistividades*, *sondeo eléctrico vertical* (SEV), la *calicata eléctrica* y la *tomografía eléctrica*.

Resistividades. El método llamado de resistividades es, sin duda, en todas sus modalidades el más importante de todos los métodos eléctricos. Permite suministrar una información cuantitativa de las propiedades conductoras del subsuelo y se puede determinar aproximadamente la distribución vertical de su resistividad.

El método de resistividades permite no sólo el estudio de formaciones horizontales, sino también la determinación de formaciones sub-verticales (fallas, filones, zonas de contacto, etc.).

Sondeo Eléctrico Vertical. El más importante de los métodos que utilizan corriente continua producida por generadores artificiales es el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV). Encuentra su aplicación principal en regiones cuya estructura geológica puede considerarse formada por estratos horizontales. La finalidad del S.E.V. es la determinación de las profundidades de las capas del subsuelo y las resistividades

o conductividades eléctricas de las mismas, mediante mediciones efectuadas en la superficie.

Calicata Eléctrica. Constituye una aplicación menos importante de estos métodos, en la que se trabaja con distancia interelectródica constante. La calicata se emplea principalmente para detectar y delimitar cambios laterales en la resistividad.

Tomografía eléctrica. Como tomografía eléctrica se entiende la visualización de alguna propiedad eléctrica del subsuelo (resistividad o impedancia general), mediante secciones continuas, generalmente verticales, pero ya se trabaja en tres dimensiones. Esta metodología es intensiva y de alto detalle o resolución y permite no solamente la prospección de acuíferos, sino que mediante su observación en el tiempo, se puede ver la dinámica hídrica. Se está usando, por ejemplo en controles de contaminantes.

En el caso de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, electrical resistivity tomography), el subsuelo se considera compuesto por una serie de elementos finitos de la misma forma, aun cuando no del mismo tamaño, cada uno de ellos con la posibilidad de tener diferente resistividad.

### **3.6.2 Sísmica de refracción**

Produciendo artificialmente un pequeño terremoto y detectando los tiempos de llegada de las ondas producidas, una vez reflejadas o refractadas en las distintas formaciones geológicas, se puede obtener una imagen muy aproximada de las discontinuidades sísmicas, que coinciden generalmente con las discontinuidades estratigráficas. Los métodos sísmicos se dividen en dos clases, el de sísmica de refracción y el de reflexión.

La sísmica de refracción consiste en generar ondas mediante un impacto o explosión aplicados en la superficie o a poca profundidad y se determina con esto la velocidad de las ondas que se propagan desde esa fuente a través del terreno, mediante una cantidad de geófonos o receptores ubicados a distintas distancias sobre la superficie del terreno. Aplicando leyes de refracción se interpretan los resultados obtenidos y se determinan las velocidades medias de los estratos más superficiales. La longitud de los perfiles obtenidos suele ser de 25 a 100m, con separación entre geófonos de 5m. Con la sísmica de refracción se determinan los espesores de recubrimientos, de la estructura del subsuelo, la ripabilidad de los materiales, así como la cubicación de áreas de préstamo, entre otras.

### **3.6.3 Sísmica de reflexión**

Este método de investigación se ha empleado poco en ingeniería geológica, si bien cada vez es más utilizado para la definición de estructuras geológicas profundas (en proyectos de túneles, para investigación de deslizamientos profundos, etc.).

El método consiste en medir los tiempos de llegada de las ondas sísmicas, generadas mediante una fuente de energía apropiada (martillo, pistola, caída de peso, dinamita, etc.), a los sensores (geófonos) dispuestos alineados según un perfil, tras ser reflejadas en las superficies de contacto de las distintas unidades litológicas, fallas, superficies de discontinuidad, etc. A partir de los tiempos de llegada de las sondas longitudinales a los geófonos y las velocidades de los distintos horizontes se pueden reconstruir las trayectorias de las ondas primarias y delimitar la disposición estructural de los distintos horizontes sísmicos a lo largo del perfil. La claridad con la que se observan estos reflectores es función de un coeficiente de reflexión que depende de la amplitud de la onda incidente y reflejada, de la diferencia de densidad entre el material inferior y superior al reflector, y de la relación de velocidades de propagación de ondas P entre ambos materiales. Cuanto mayor sea la diferencia de competencia entre los materiales que limitan una superficie de discontinuidad o contacto litológico, más claramente se observará el reflector.

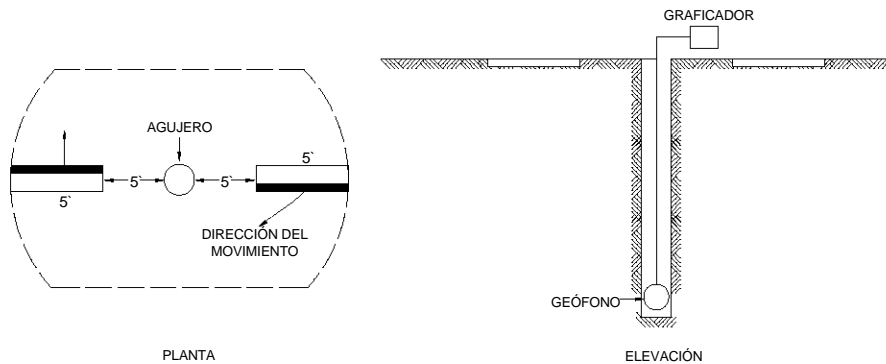
La generación/transmisión de ondas sísmicas lleva asociada otros tipos de ondas originadas por las condiciones de superficie, ruido aleatorio ambiental, reflexiones múltiples, etc., que se registran al mismo tiempo que las ondas primarias y enmascaran los resultados. Su atenuación es posible mediante el tratamiento de las señales durante la interpretación.

La técnica de la sísmica de reflexión presenta la ventaja, respecto a otras técnicas geofísicas, de que permite representar gráficamente múltiples horizontes con un único disparo, sin perder precisión de manera significativa con la profundidad.

Permite definir la localización de los saltos de falla, las estructuras de recubrimiento, los límites de un acuífero, etc. Este método es el más empleado en prospección petrolera ya que permite obtener información de capas muy profundas.

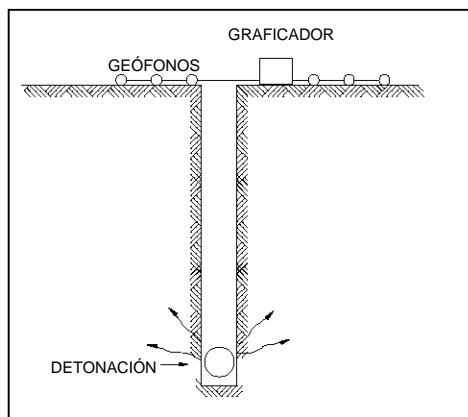
#### **3.6.4 Pruebas *up-hole*, *down-hole* y *cross-hole***

Método *down-hole*. En este método la fuente generadora de onda está constituida por una placa firmemente anclada en la superficie del terreno y sobre la cual se impacta con un mazo, el paso de las ondas generadas se capta en dos geófonos indicados a una distancia fija dentro de un sondeo. (Fig. 3.9)



**Figura 3.9.** Método *Down - Hole*

Método up-hole. En este método los geófonos son instalados en la superficie y las ondas se generan mediante cargas explosivas detonadas a distintas profundidades dentro de un sondeo adyacente (Fig. 3.10).

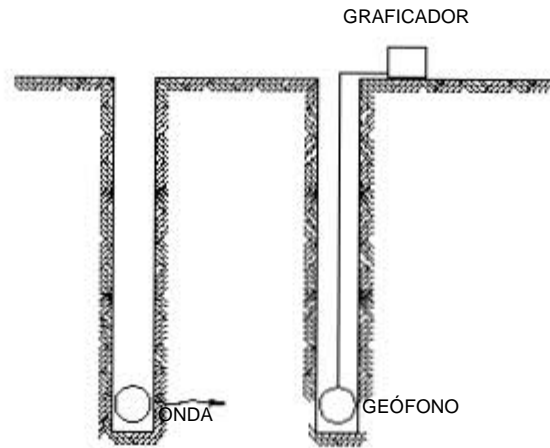


**Figura 3.10.** Método *Up-hole*

Los métodos anteriores permiten determinar las velocidades de ondas bajo estados tensionales de poca magnitud debido a la baja energía de los eventos generadores y a las distancias largas a las que se ubican los receptores. Un método de generación y registro de la propagación de ondas a altos niveles de tensión es el siguiente:

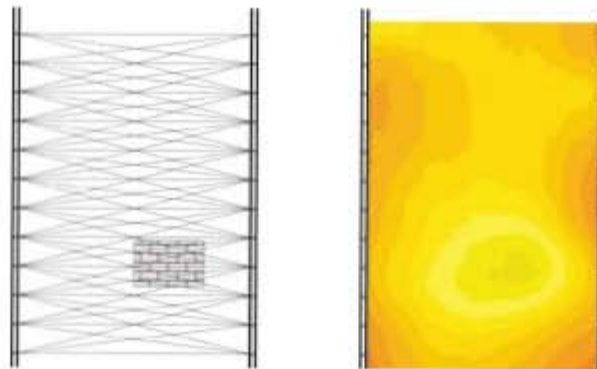
Método cross-hole. Consiste en evaluar la velocidad de ondas de cortante ( $V_s$ ) generando pequeños núcleos de energía a diversas profundidades en un agujero y leyendo en el otro los tiempos de viaje de las ondas. Todo esto se lleva a cabo empleando osciloscopios, transductores y equipo fotoeléctrico que permite grabar los récords de los impulsos.





**Figura 3.11.** Método *cross-hole*

El método se utiliza con ventaja para materiales entre roca y arcilla, sin que el nivel freático (N.A.F.) lo afecte. Se puede hacer un muestreo con posteadoras manuales y equipo de perforación simple, lo que lo hace ventajoso.



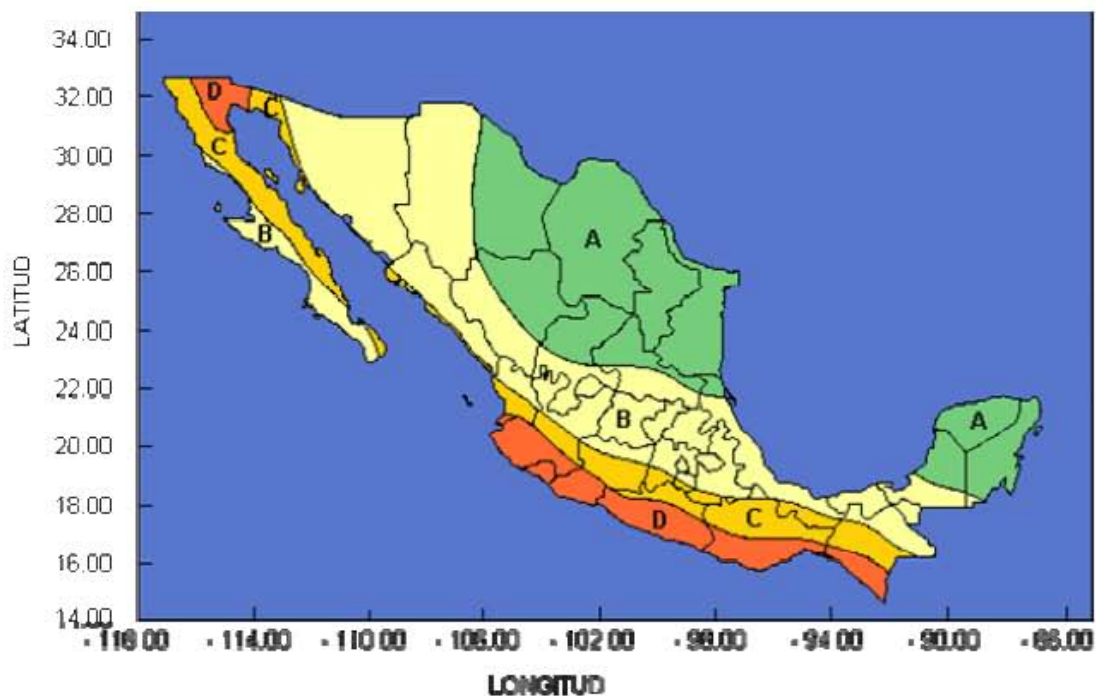
**Figura 3.12.** Tomografía *cross-hole*, esquema y tomografía.

### 3.6.5 Sismos de diseño

En los proyectos de presas hay que considerar la acción sísmica que pueda afectar a la estructura en el caso de un terremoto de magnitud significativa. En muchas áreas la actividad sísmica es muy baja, pero en otras puede ser muy alta, como en las zonas próximas al contacto de placas tectónicas (cordilleras de los Alpes, los Andes, Himalaya, Cáucaso, Turquía, etc.).

La República Mexicana se encuentra dividida en cuatro zonas sísmicas (fig. 3.13). Esto se realizó con fines de diseño antisísmico. Para realizar esta división se utilizaron los catálogos de sismos de la República Mexicana desde inicios de siglo, registros históricos y los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos en este siglo. Estas zonas son un reflejo de qué tan frecuentes son los eventos tectónicos en las diversas regiones y la máxima

aceleración del suelo a esperar durante un siglo. La zona A (asísmica) es una zona donde no se han reportado sismos de importancia en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D (sísmica), donde la ocurrencia es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son intermedias (penesísmicas), 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. Aunque la Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B, debido a las condiciones del subsuelo del valle de México, pueden esperarse altas aceleraciones.



**Figura 3.13. Regiones Sísmicas de México** (Tomado del Manual de diseño de Obras Civiles - Diseño por Sismo- de la Comisión Federal de Electricidad).

Según el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses del Ministerio de Fomento español, los terremotos de diseño para el cálculo dinámico de estabilidad de la presa se determinarán a partir de los periodos de retorno indicados en la tabla 3.5.

Clasificación de presas	Sismicidad		
	Baja	Media	Elevada
C	NA	TP = 1,000 años	
B		TP = 1,000 años TE = 3,000 a 5,000 años	TP = 1,000 años TE = 10,000 años
A			

**Tabla 3.5.** Periodos de retorno de los sismos de cálculo para las presas. (CNEPG, 1999). NA no es necesaria la consideración explícita de la acción sísmica; TP: terremoto de proyecto; TE: terremoto extremo.<sup>3</sup>

### 3.6.6 Sismicidad inducida

En presas o embalses de grandes dimensiones, sobre todo en zonas sísmicamente activas, debe considerarse el fenómeno de la sismicidad inducida. Este tipo de sismicidad tiene lugar cuando el nivel del embalse alcanza alturas del orden de 100m, o bien la capacidad del embalse es superior a 100 millones de metros cúbicos.

Este tipo de sismicidad se debe a fenómenos de fracturación hidráulica a favor de fallas sometidas a elevadas presiones intersticiales. En la mayor parte de las presas analizadas, los terremotos han ocurrido en el primer llenado del embalse, disminuyendo la intensidad y la frecuencia de los terremotos en el transcurso de la explotación. Como consecuencia, es necesario efectuar un análisis de la sismicidad natural e inducida en zonas sísmicamente activas y proceder al llenado del embalse de forma escalonada y controlada.

En la tabla 3.5 se presenta una relación de embalses en donde se han registrado la magnitud de eventos sísmicos asociados a su llenado.

Embalse	Magnitud	Altura de presa
Koina (India)	6.5	103
Kremasta (Grecia)	6.3	165
Kariba (Zimbabwe y Zambia)	6.2	128
Hsinfengkiang (China)	6.1	105
Oroville (USA)	5.8	230
Korube (Japón)	4.9	186
Nurek (Tadjikistán)	4.6	317
Volta Grande (Brasil)	4.2	56

### 3.6.7 Fallas activas

La neotectónica o tectónica cuaternaria, trata del estudio, análisis e interpretación de las fallas geológicas activas, cuya sismicidad ha deformado la superficie del terreno de manera acumulativa durante milenios. Al respecto, no hay una definición universalmente aceptada para una falla activa, pero la que más se

aproxima al común de los casos dice "una falla activa es la que tiene el potencial para moverse bajo el campo de esfuerzos tectónicos actuantes y producir sismos catastróficos". En términos más simples, podemos considerar una falla activa como aquella que ha deformado o desplazado los depósitos cuaternarios. En cada caso particular, la definición puede ajustarse a conceptos más precisos, dependiendo del tipo de investigación que se adelante: si es de carácter regional y científica, o bien que se requiera para el cálculo especial de la amenaza sísmica en un sector particular, como en el caso de la construcción de una central nuclear, entre otros.

En el diseño de proyectos de ingeniería civil, que contemplan la construcción de grandes obras, tales como centrales hidroeléctricas, se debe tener en cuenta la influencia de las fallas geológicas activas que puedan afectar las estructuras, bien sea por la sismicidad potencial que éstas representan, o bien, por movimientos de reptación del terreno, asociados con tal actividad. Mucho más comunes son los movimientos de remoción en masa, derivados de la fragmentación del subsuelo por los movimientos episódicos de las fallas, generalmente prehistóricos, que han predisposto el terreno para que falle por deslizamientos gravitacionales comunes o, por movimientos co-sísmicos, dentro del radio de influencia de las fallas activas.

En el estudio de las fallas geológicas activas, se deben identificar todos los lineamientos estructurales correspondientes y categorizar las formas del terreno asociadas, de acuerdo a su desarrollo topográfico, que en algunos casos se relacionaría con el grado de actividad de la falla. Se puede asumir, de manera tentativa, que a una mayor expresión morfológica, se asocia una mayor actividad tectónica. Pero la tasa de erosión selectiva y los factores litológicos influyen notablemente en esta apreciación, la cual hay que evaluar con cautela. En consecuencia la categorización inicial de las fallas activas, con base en esta metodología, es sólo una herramienta inicial de trabajo.

La identificación de indicios morfológicos tales como escarpes de falla, facetas triangulares, silletas de falla, lagunas de falla, lomos de obturación, lomos de presión, ganchos de flexión, topografías desplazadas, corrientes decapitadas etc., y su grado de desarrollo, permite elaborar un mapa neotectónico preliminar, el cual constituye la base de la investigación detallada de las fallas en el campo. Estas geoformas diagnósticas de la actividad de las fallas, se originan por la repetición de numerosos eventos sísmicos generalmente con magnitudes mayores a  $M = 6.5$ , que con el tiempo construyen la gran variedad de rasgos morfológicos.

La comprobación de las deformaciones internas del terreno, mediante la apertura de trincheras, permite definir con alto grado de certeza la posible tasa de actividad de las fallas. Sólo cuando un rasgo geológico sospechoso de representar actividad se asocia con una clara ruptura estratigráfica cuaternaria, se puede tomar como evidencia paleosísmica y así asumir que la falla es tectónicamente activa.

En ciertos casos, cuando se conoce la edad de los depósitos deformados, es posible precisar aún más la actividad de las fallas dentro de rangos menores de tiempo y referirlas, por ejemplo, al Pleistoceno, Holoceno o a la época reciente, lo

que constituye una información valiosa para la estimación de su tasa de actividad y posible período de recurrencia. Los métodos radiométricos: K/Ar, U/Pb, Rb/Sr y otros, son de gran utilidad en estos procedimientos.

En la evaluación del grado de actividad sísmica de una falla se deben considerar varios factores, además de los morfológicos: el marco tectónico general, la geología regional, la sismicidad histórica, la macrosismicidad, la sismicidad instrumental y la geología local.

El grado de actividad de una falla o de un segmento de una falla particular, es función de la cantidad de desplazamiento en un evento individual y de la frecuencia de los desplazamientos. Las fallas que tienen una tasa alta de movimiento, entre 10 y 100 mm/año, como el caso de la falla de San Andrés, en California, EEUU, tienen un grado de actividad alto.

Con la *longitud de ruptura en superficie* (LRS) del segmento movable de la falla, expresado en kilómetros, utilizando ecuaciones o gráficas de regresión (L/M<sub>0</sub>), se calcula la *Magnitud Momento* (M<sub>0</sub>) máxima probable de un episodio sísmico, pasado o potencial, el cual es un dato fundamental en la evaluación de la amenaza sísmica  $M_0 = 5.08 + 1.16 \cdot \text{LOG}_{10}(\text{LRS})$ , que tiene la ventaja, sobre la magnitud de Richter, que no se satura, como lo hacen los sismogramas del registro instrumental, para las magnitudes altas.

Las Magnitudes M<sub>0</sub>, junto con la tasas de desplazamiento, se utilizan con gráficas de regresión para el cálculo del período de recurrencia de los posibles eventos sísmicos, el cual puede variar de decenas a miles de años o más. Lograr establecer en cuanto tiempo se repetirá una magnitud dada, es algo incierto en la mayoría de los casos, pero con base en los estudios de paleosismicidad, se pueden obtener valores de la magnitud máxima probable en una fuente. El tratamiento estadístico de ésta información, incluyendo datos históricos y de macrosismicidad, permiten estimar las posibles aceleraciones del terreno, que en un evento pueden incidir con severidad en las obras de ingeniería civil.

El conocimiento de la microtectónica (estrías de fricción y otras deformaciones) y de la solución de los mecanismos focales asociados a la sismicidad superficial, constituyen factores de notable utilidad en la interpretación del sentido de movimiento de las fallas activas y de la dirección de los esfuerzos tectónicos actuantes.

La información neotectónica debe ser incluida dentro de las zonas sísmicas en los estudios de micro zonificación sísmica. El dato más confiable es el obtenido con los desplazamientos estratigráficos observables en el subsuelo mediante la apertura de trincheras

### 3.6.8 Método magnetométrico

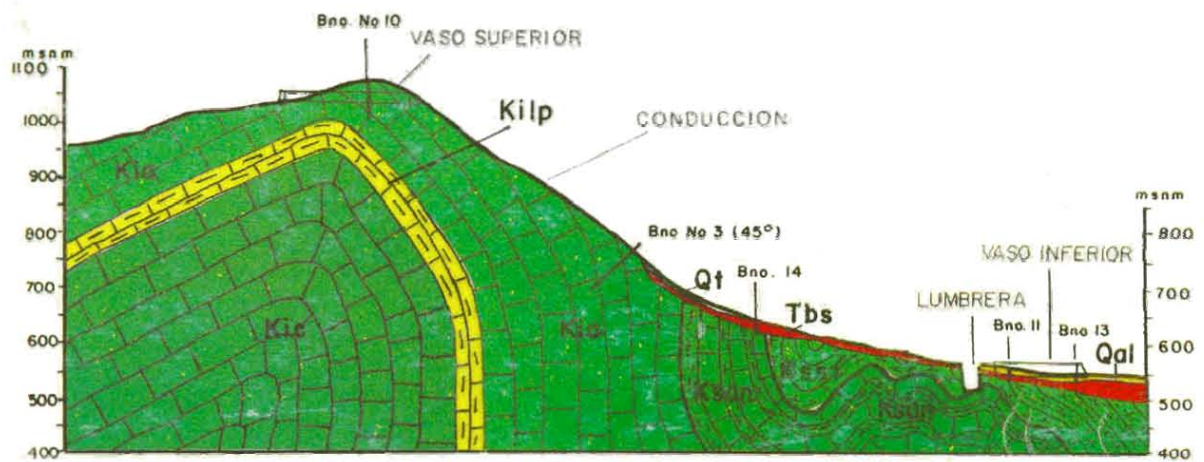
La tierra es un imán natural que da lugar al campo magnético terrestre. Las pequeñas variaciones de este campo pueden indicar la presencia en profundidad de sustancias magnéticas. El método magnético sirve para dar información sobre el basamento y su profundidad particularmente para entornos cristalinos y metamórficos. De igual manera ayuda a estudiar la geología regional y estructural.

Los dos métodos mas utilizados son:

Very Low Frequency (VLF): Medidas electromagnéticas que permiten delimitar fracturas o fallas. Particularmente útil en caso de estudio de acuíferos fracturados como los sistemas cársticos.

Sondeos Electromagnéticos en el dominio temporal (SEDT o TDEM en ingles): El método tiene ventajas sobre otros, como su capacidad de mayor poder de penetración que permite obtener información hasta profundidades más altas y a través de recubrimientos conductores.

## CAPÍTULO 4: PROSPECTOS EN MÉXICO



Corte geológico. Tomado del estudio "Factibilidad Geológica de la alternativa Cerro El Topo para el PHAEB Monterrey, N.L.", por José Vargas Badillo y Jesús E. Gómez Sosa, CFE.

## PROSPECTOS EN MÉXICO

**OBJETIVO:** describir estudios geotécnicos para la ubicación de las centrales de rebombeo realizados en el país, a distintos niveles.

### 4.1 SITIO LOS CUARTONES (Evaluación)<sup>16</sup>

Para este sitio se estudió un área de 32.5 km<sup>2</sup>, teniéndose cuatro opciones para vaso superior y tres para vaso inferior, para tener un aprovechamiento de 1000 m de carga y la infraestructura que se tiene en la zona. Los vasos superiores se denominaron: Cuartones, La Tinaja, Cerro El Alto y Cerro San Francisco; los inferiores son San Francisco, Arroyo Cuartones y Cañada El Gringo. Se desarrolló un anteproyecto para el sistema Cuartones-San Francisco, en el cual se establece una potencia de generación de 1,000 MW y la necesidad de disponer de 5.3 Mm<sup>3</sup> de agua para el llenado inicial.

#### 4.1.1 Localización del proyecto

El área de estudio se ubica a 36 km en línea recta al S-SE de Monterrey-N. L. y a 8 km al poniente de la Presa La Boca. Para llegar al vaso inferior es necesario viajar por la carretera federal 85 y 4 km de terracería. Para tener acceso al vaso superior hay que subir 1 km, entrando por Cola de Caballo hasta El Manzano con un recorrido de 20 km de carretera y posteriormente un camino de terracería de 8 km.

Los sitios para vaso superior y línea de conducción se caracterizan por la presencia de cerros escarpados y otros de formas redondeadas. Se presentan altitudes entre 1500 y 2000 m, como se observa en la figura 4.1.

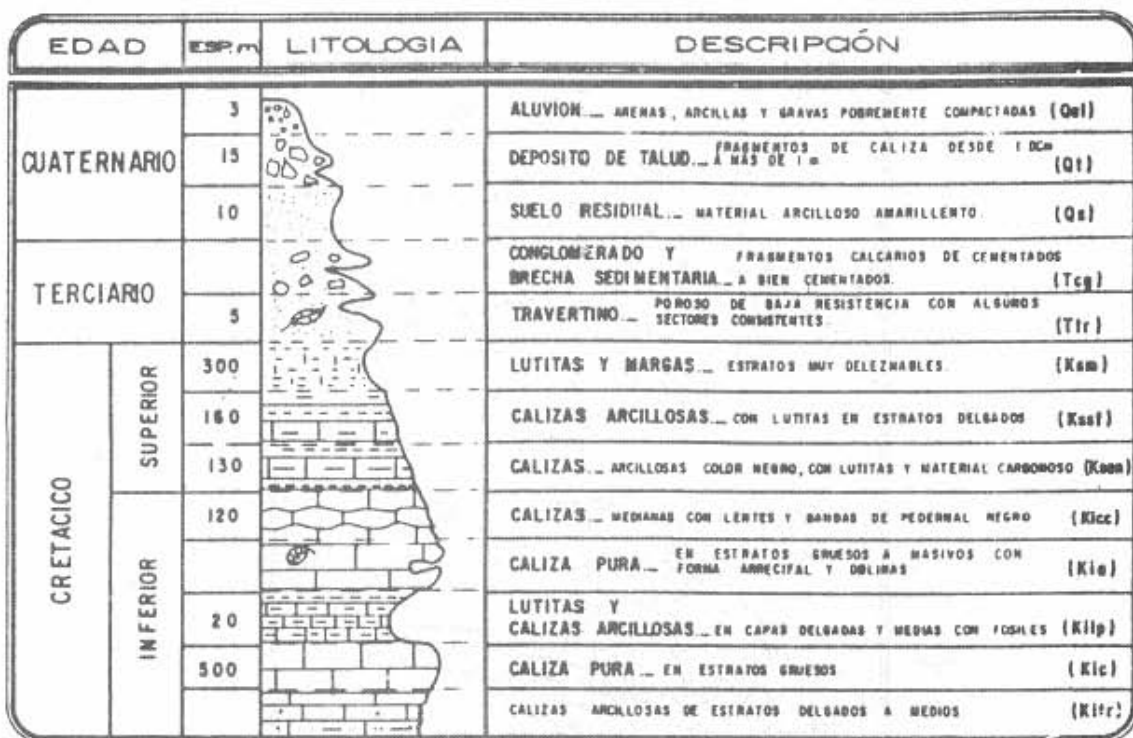
El vaso superior Cuartones es el que presenta mejores condiciones debido a que es una hondonada con su boquilla y tiene la mejor capacidad de almacenamiento. La Tinaja requiere una cortina demasiado alta y larga. En los Cerros El Alto y San Francisco es necesario descapotar y construir en su totalidad los vasos, con la salvedad que en El Alto se ganan 200m de carga.

De los sitios para vasos inferiores el San Francisco es el mejor, con 600 msnm considerando solo la topografía; requiere de una cortina de 45m de alto contra 70m que se necesita en cañada El Gringo y Arroyo Cuartones, además de que la capacidad de carga en éstos es de sólo 1/3 del primero.





## LOS CUARTONES



**FIGURA 4.2.** Columna estratigráfica del área Los Cuartones.

La falla que más afecta a la zona es la Falla Frontal (T. Díaz, 1951) llamada también Cabalgadura Mayor por Padilla y Sánchez (1985) y Cabalgadura El Cercado por CFE (1987). Cruza toda el área noreste en dirección NW-SE y con un plano de falla buzando hacia el SW y tiene algunas centenas de km de longitud.

El rumbo general de los estructuras anticlinales tienen dirección NW-SE (.El Gringo, Cuartones y sus sinclinales correspondientes: Nogalillo, La Tinaja y Los Cuartones) y los echados que se pueden ver en estas estructuras varían de 28 a 86°. Los menores corresponden a las proximidades del eje sinclinal o anticlinal y los mayores a los flancos de ambas estructuras.

Otras estructuras que destacan por su paralelismo y tamaño son cuatro lineamientos, todos en dirección NE-SW, que cuando menos son zonas de fracturamiento; dichas estructuras se han denominado de la siguiente forma: Los Cuartones, Puerto El Gringo, La Tinaja y Las Lajitas. Son casi perpendiculares a la Falla Frontal y su longitud varía de 1.5 a 2.0 km aproximadamente.

En las depresiones para vaso superior se cartografiaron varias dolinas con diámetros de 10 a más de 20m y alineados en el mismo sentido que las capas de calizas.

En el sector oriental de la Falla Frontal, existen manantiales que originan la formación de depósitos locales de travertino. Por otra parte, existe también en

varios lugares de la zona, sobre todo encima de la Formación Méndez, una brecha de clastos calcáreos, bien cementada y compactada.

En los lugares para vasos superiores Los Cuartones y La Tinaja, existen depresiones que se deben a fenómenos cársticos y sinclinales, caracterizándose por la presencia de las formaciones Agua Nueva, Cuesta del Cura y Aurora, ésta última con numerosas dolinas. La parte más baja de estas pequeñas depresiones tiene una cubierta de arcilla residual cuyo espesor se determinó en Cuartones con sondeos eléctricos verticales estimándose un promedio de 3.0 m con máximas de 5.0 m.

Los correspondientes a Cerro Alto y Cerro San Francisco, se encuentran sobre anticlinales en los que afloran las formaciones Aurora y Cupido, muy fracturadas y con disolución intensa.

En relación al sitio para vaso inferior, las condiciones más favorables desde el punto de vista geológico, se presentan en la alternativa San Francisco, donde las lutitas de la Formación Méndez favorecen la estanqueidad. Los sitios Cañada El Gringo y Arroyo Cuartones tienen el inconveniente de una extensión considerable de depósitos de talud, cuyo espesor se desconoce y se infiere que cubren a rocas de la Formación Taraises.

Prácticamente para todas las opciones de conducción, ésta se ve complicada, ya que cruzará la mayoría de las formaciones con diferentes posiciones estructurales; además, sobre una topografía relativamente abrupta. En la figura 4.3, se muestra un perfil geológico esquemático.



**FIGURA 4.3.** Perfil geológico esquemático que ilustra las unidades y su posible comportamiento estructural en la línea de conducción.

### **4.1.3 Disponibilidad de agua**

La carsticidad y fracturamiento observados en las calizas de las formaciones Aurora y Cupido, asociados a otros factores como la precipitación de 1000 a 1200 mm. (lo más alto en Nuevo León), la presencia de manantiales entre las cotas 650 y 900 msnm en las lutitas de la Formación Méndez sobre el costado oriental de la Sierra, así como la disposición estructural de las diversas formaciones con respecto a la Falla Frontal, permiten inferir la presencia de una superficie freática a la cota de 900 m aproximadamente.

Se deduce que la precipitación se infiltra a través de las fracturas y zonas de disolución de las calizas expuestas en las partes más altas de las sierras y circula por ellas, hasta llegar a un horizonte impermeable que puede ser la base de la Formación Taraises, el plano de la Falla Frontal o las lutitas de la Formación Méndez, ocasionando con ello un almacenamiento de agua hasta la cota 900m, ya que ésta es la elevación que alcanzan los manantiales que brotan sobre la Formación Méndez desde la cota 650m.

Los condiciones geohidrológicas anteriores, sirven para plantear la construcción de una galería filtrante, que permita suministrar el volumen de agua para el llenado inicial y más tarde reponer los pérdidas por evaporación principalmente, ya que la infiltración debe ser reducida con impermeabilizantes.

### **4.1.4 Bancos de material**

#### *Roca*

Las calizas de las formaciones Cupido y Aurora pueden ser útiles en este aspecto, además de que se encuentran cercanas a todas las opciones de vasos; inclusive su excavación se podrá usar para aumentar la capacidad de los mismos.

#### *Material para impermeabilizar*

Es posible que los bancos de lutitas de las formaciones Agua Nueva o Méndez sean útiles, así como los lentes y capas arcillo-limosas intercaladas en los conglomerados terciarios cartografiados en conjunto y consignados en el plano geológico como Tcg y que están localizados en las inmediaciones del vaso inferior San Francisco.

La Formación Agua Nueva aflora en el V.S. Cuartones y V.S. La Tinaja, extendiéndose considerablemente hacia el occidente.

En ambas fuentes de material se recomienda realizar pruebas de mecánica de suelos, con el fin de conocer sus propiedades impermeabilizantes para luego estimar su volumen.

## *Gravas*

Se pueden explotar para la obtención de gravas los horizontes conglomeráticos mal consolidados de la unidad Tcg.

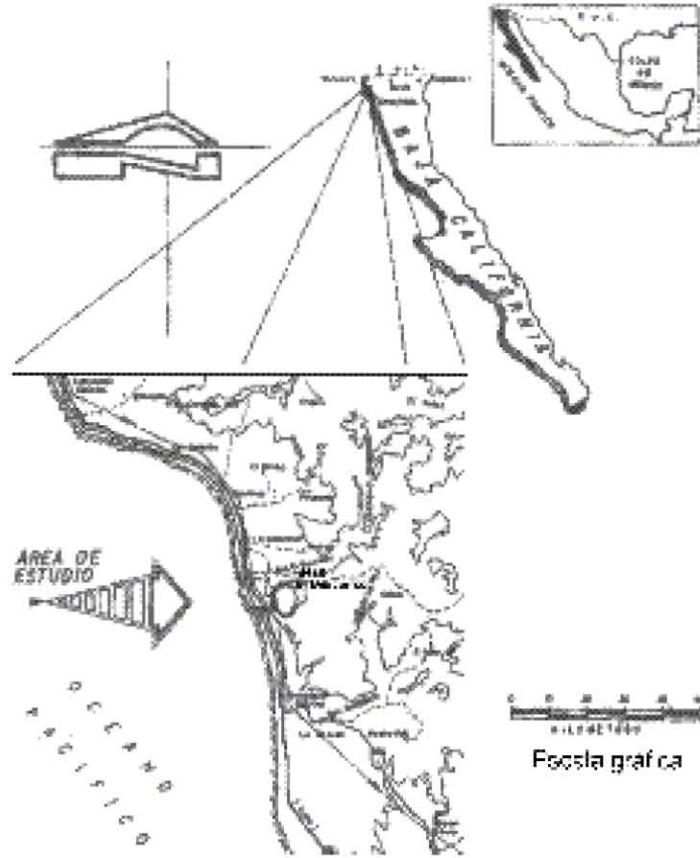
Otra posible fuente se presenta cerca del poblado La Ciénega, unos 2 km hacia el SW del V.S. La Tinaja, también cercana al camino El Manzano-Laguna de Sánchez.

## **4.2 PROYECTO EL DESCANSO (Prefactibilidad)<sup>16</sup>**

### **4.2.1 Localización del proyecto**

El PHAEB El Descanso se localiza en la mesa del mismo nombre, a 55 km al sur de Tijuana, Baja California, Méx. (Figura 4.4); los estudios realizados tuvieron una duración de 6 años, entre 1986 y 1992. Las condiciones topográficas del sitio son favorables y se aprovecharía el Océano Pacífico como vaso inferior y la Mesa El Descanso, como vaso superior. Este proyecto es de gran importancia tanto en el ámbito nacional como en el internacional, debido a la posible venta de energía de picos a los Estados Unidos y por el hecho que sería el primer aprovechamiento de rebombeo de gran carga en el mundo que utilizaría agua de mar para la generación de energía eléctrica.

El desnivel entre el Océano Pacífico y la Mesa El Descanso es de 365m en una distancia relativamente corta (1800m). Al estar a solo 50km de la frontera con EU, la energía se podría vender a las compañías americanas que siempre necesitan de ésta. Dos de los factores más importantes por resolver en este proyecto son los asentamientos humanos y el uso de suelo para turismo que se tiene en la actualidad.



**FIGURA 4.4.** Localización del proyecto El Descanso

#### **4.2.2 Descripción del proyecto**

Se tienen dos alternativas para este proyecto, una subterránea y otra superficial. Para iniciar se tiene contemplada una capacidad de producción de 1,000 MW hasta llegar a 4,000 MW en tres etapas posteriores de construcción, debido a la gran demanda de energía. En la figura 4.5 se presentan los cortes de las dos alternativas.

##### *Vaso superior*

La Mesa El Descanso tiene una superficie de 800 hectáreas, elevación media de 365msnm y se encuentra a 1,800m de la línea de costa. Para la construcción del vaso superior únicamente se aprovecharía la quinta parte la superficie de la mesa, con una capacidad útil de 25 Mm<sup>3</sup>, un volumen de excavación estimado de 6.5 Mm<sup>3</sup> y un bordo de contención en el resto del perímetro con una longitud de 3,620 m y volumen total de 4.3 Mm<sup>3</sup>.

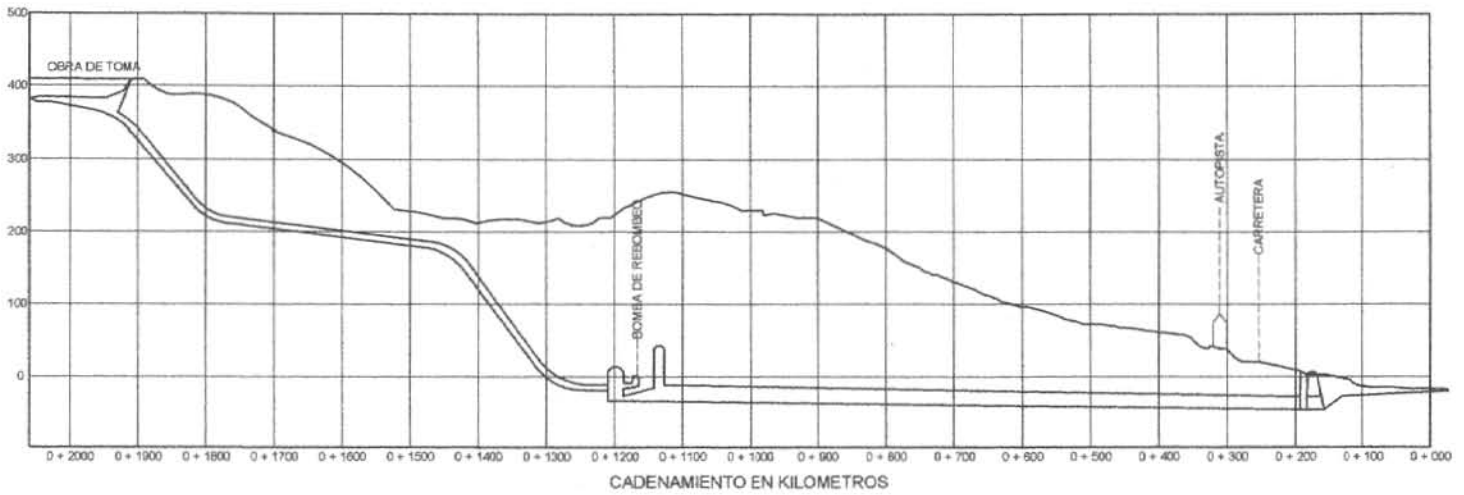


Fig. 4.5a: Alternativa con casa de máquinas subterránea

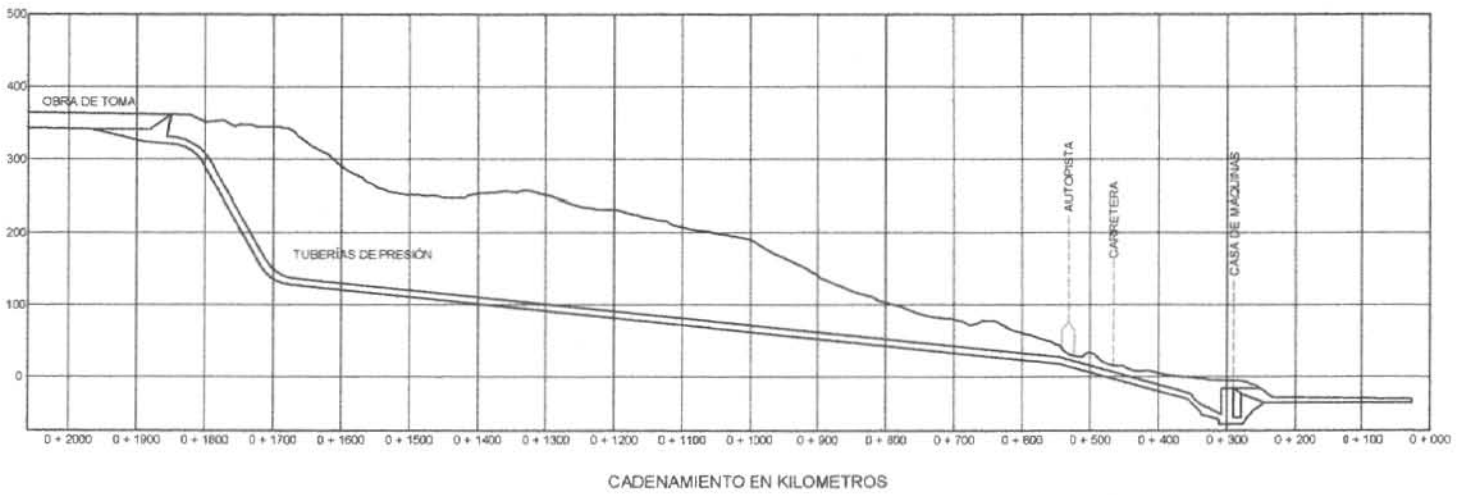


Fig. 4.5b: Alternativa con casa de máquinas superficial

Este vaso estaría forrado en su plantilla, bordos de contención y muros en corte, con una capa de arcilla de 1.60 m de espesor con el fin de evitar fugas de agua

salada y prevenir problemas de contaminación a los manantiales de la zona. La solución de revestir con arcilla, aunque es un poco más costosa que impermeabilizar con concreto o asfalto, es más eficaz dada la ubicación del proyecto dentro de una zona sísmica.

Los niveles de agua máximo de operación del tanque NAMO = 388.50 y el mínimo NAMINO = 369, obligan a construir el bordo de contención con una altura máxima de 41m. La localización, geometría y dimensiones del vaso superior es válida para las dos alternativas básicas del proyecto.

#### *Obra de toma*

Está constituida por una estructura en rampa con capacidad para 300 m<sup>3</sup>/s, que alimenta dos tuberías a presión para la alternativa exterior y una para la subterránea; ambas estructuras cuentan con rejillas, guías para compuertas de servicio y auxiliares, conductos de ventilación, equipo para levantar las compuertas y de una estructura contigua para desarenar.

El acceso del agua a esta estructura es a través de un Canal de Llamada, con plantilla a la elevación 347 msnm. La obra de toma tiene la misma geometría en las alternativas exterior y subterránea; sin embargo, su localización es diferente según la opción que se trate.

#### *Conducción a presión*

##### *- Alternativa Exterior*

Está constituida por dos túneles de 6.50 m de diámetro, revestidos de concreto y parte de su longitud con blindaje metálico, que alimentan mediante un distribuidor en peine a cuatro turbinas de 250 MW de potencia cada una.

El desarrollo total de la conducción es de 1 670 m, sin embargo la longitud del túnel está limitada por el techo de roca adecuado, por lo que el extremo del mismo se ubica antes del cruce con la Autopista Tijuana-Ensenada, a partir de ese punto la excavación para alojar la tubería es en tajo.

La conducción queda alojada en las unidades geotécnicas denominadas U1, U2 y U3, que se consideran competentes para su excavación. La U4 será retirada totalmente por localizarse en la zona del peine de la Obra de Toma y de la Casa de Máquinas que se plantea como solución preliminar.

Para la reducción del golpe de ariete se han planteado válvulas de alivio en bypass lateral con drenaje directo al cárcamo de succión y desfogue; sin embargo actualmente se tienen en estudio los dispositivos más adecuados para el control de los fenómenos transitorios originados por un rechazo de carga o por paro accidental de la operación de las bombas.



*- Alternativa subterránea*

Está constituida por un túnel de 9 m de diámetro que cruzaría las andesitas, basaltos y tabas de las unidades U1, U2 y U3; estaría revestido de concreto y parte de su longitud con blindaje metálico para evitar fugas de agua por las fracturas de las rocas y erosión acelerada. Se colocaría en el interior un distribuidor en forma de peine que alimentará las cuatro unidades contempladas en el proyecto. En vista que debido a su trazo, la conducción cruzará las cinco unidades geológicas será conveniente realizar su excavación por medios mecánicos.

*Casa de Máquinas*

*-Alternativa exterior*

Se localiza sobre la costa y su plantilla requiere profundizarse aproximadamente hasta la cota -37 (mbnm), para tener sumergidos lo necesario los equipos (mínimo 25 m), desplantando la cimentación en la unidad U5, que se estima apta para este propósito.

Se proyecta alojar 4 grupos de turbinas Francis reversibles en una estructura de 20 m de ancho, 35 m de altura y 130 m de longitud.

El acceso al piso de excitadores (-15m) se programó a partir de la carretera, mediante un camino con desarrollo de 640 m, cuyo tramo final de 135 m es en túnel.

La ubicación de la subestación eléctrica y transformadores se propone en una plataforma a la elevación 25, sobre una zona de relleno anexa a la casa de máquinas.

*-Alternativa subterránea*

Se proyecta alojar 4 grupos de turbinas Francis reversibles en una caverna de 20m de ancho, 100m de longitud y 44m de alto; dentro de la misma caverna se ubicarán las válvulas para cada una de las unidades. El acceso se hará por medio de un túnel de 820 m de longitud, con las dimensiones necesarias para el ingreso del equipo de la central y de la maquinaria de construcción requerida.

Paralelamente se tiene proyectada una caverna de dimensiones menores donde se ubicarán los transformadores.

## *Salida del Desfogue/Obra de Toma en el mar*

### *- Alternativa exterior*

El desfogue tiene control con compuertas para cada unidad, operadas desde el piso de maniobras (elevación 6 msnm). Los conductos se protegen con rejillas y mallas para impedir el paso de boleas y sedimentos, así como objetos y animales al interior.

Para las obras exteriores que consistirán en un canal de acceso y escolleras será necesario conocer el modelo hidráulico para determinar las dimensiones, orientación y características que muestre como las más favorables.

### *- Alternativa subterránea*

Se localiza sobre la costa, se excavará a cielo abierto y la forma una estructura inclinada y equipada al igual que en la exterior con rejillas y mallas que impidan el paso de objetos o animales al interior del conducto. Se tiene control con compuertas en el conducto, operadas mediante una lumbrera vertical.

Las características de los equipos hidráulicos, mecánicos y eléctricos serían las mismas que en el caso de la central exterior.

Las ramas inclinadas del desfogue conducirán el agua hasta los pozos de oscilación, de donde saldrá al exterior por un solo conducto, totalmente en túnel, con una longitud de 956 m y con una sección portal de 13,50 m.

## **4.2.3 Funcionamiento de la planta**

Desde las condiciones del sistema eléctrico, esta planta requiere generar 6 u 8 horas diarias de lunes a viernes, con dos horas de reserva y bombear entre cuatro y ocho horas diarias de lunes a viernes, así como entre 10 Y 12,5 horas los fines de semana, con el fin de reponer el volumen de agua utilizado; por lo cual el tanque resulta de regulación semanal.

Al adoptar este funcionamiento y al definir la capacidad útil requerida por el vaso superior, se ha considerado, en forma conservadora, una eficiencia del sistema de 67% lo que indica que por cada hora de generación tendremos que bombear 1,5 horas.

#### **4.2.4 Estudios geológicos**

En el sitio se tienen lutitas, areniscas y conglomerados de la Formación Rosario (Ksr), basaltos, andesitas y tobas de la Formación Rosarito Beach y depósitos no consolidados recientes (terrazas marinas, depósitos aluviales y suelos). La exploración geológica realizada permitió determinar una secuencia estratigráfica constituida por cinco unidades que a partir de la superficie son:

U1 - Andesitas porfídicas de augita, con diaclasas verticales y sub - horizontales

U2 - Basaltos porfídicos masivos o vesiculares

U3 - Tobas arenosas compactas y Tobas areno - arcillosas de composición dacítica

U4 - Conglomerado fino, constituido por fragmentos de rocas volcánicas y metamórficas

U5 - Limolitas finamente laminadas con intercalaciones de areniscas y conglomerados. En la figura 4.6 se presenta la columna estratigráfica obtenida, donde se muestran las diferentes formaciones y su correspondiente unidad geotécnica asociada.

La estructura del área corresponde a una serie de bloques delimitados por fallas casi paralelas a la línea de la costa, además de por lo menos dos fallas importantes con saltos variables, perpendiculares a las anteriores, lo cual es el resultado de la gran actividad tectónica de la Península de Baja California y la causa de una disposición litológica muy variable.

Las condiciones del subsuelo no son muy propicias para excavaciones subterráneas, ya que se tendrían que cruzar varias fallas y la casa de máquinas cuyas dimensiones serían de 50x100x20m tendría que excavarse en las limolitas; sin embargo, es posible realizarlas con el uso de procedimientos de construcción cuidadosos y con un tratamiento adecuado de la roca.

#### **4.2.5 Estudios oceanográficos**

El estudio oceanográfico se realizó durante 8 años, con el objeto de conocer las condiciones que predominan en el sitio, tales como dirección predominante de las corrientes marinas, el oleaje, la batimetría, el arrastre de sedimentos y las variaciones de temperatura, entre otros.

#### **4.2.6 Sismicidad y riesgo sísmico**

Desde el punto de vista regional, El Descanso se localiza en la Zona Sísmica 1 de la República Mexicana (Esteva, 1970) y está caracterizada por un alto nivel de actividad sísmica de pequeña magnitud, con escasos eventos registrados de magnitud 6 en la escala de Richter de acuerdo con el Catálogo Nacional de Sismos que comprende el periodo de 1930 a 1970.

La importancia de determinar las características sismológicas del sitio es debida a su cercanía con el sistema de fallas de San Andrés y constituyen la frontera deslizante entre la Placa tectónica del Pacífico y la de Norte América.

El potencial sísmico del área está determinado por la Falla de Vallecitos-San Miguel, de la cual se podría esperar el máximo sismo posible de magnitud 8, que corresponde a una aceleración horizontal máxima de 0.18g, considerando que las obras queden sobre roca sana.

ERA	SISTEMA	EPOCA	ESPESOR (m)	DESCRIPCIÓN	FORMACIÓN	UNIDAD		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	-3 m	- Suelos residuales arcillo-arenosos				
			-14 m	- Aluvión				
				-20 m	- Abanico aluvial, constituido por rocas volcánicas de hasta 10 cm. de diámetro			
				-10 m	- Depósitos de talud, constituidos principalmente por bloques de andesita			
	TERCIARIO	MIOCENO			- Terrazas marinas conglomeráticas cubiertas por terrazas arcillo-arenosas de color café oscuro que contienen abundantes fragmentos subredondeados y bien redondeados de hasta 40 cm. de diámetro.	M. Descanso M. Los Indios	U1	
					- Andesitas porfídicas de aguja con diaclasas prismáticas verticales y subhorizontales, de color verde parduzco a negro grisáceo.	M. La Mesa M. La Misión		
					- Coladas de basaltos de color café rojizo a negro, con intercalaciones tabulares y lenticulares de tobas.	M. La Misión	U2	
					- Tobas arenosas de composición dacítica, riodacítica o ríolítica presentan estratificación irregular e intercalaciones lenticulares de basalto.	ROSARITO BEACH	U3	
					+40	- Conglomerado brechoso (A) constituido por fragmentos subredondeados y subangulosos de rocas ígneas (ácidas y básicas) y metacuarcitas, contenidos en una matriz arcillo-arenosa y pequeños espesores de tobas. (B) Conglomerado conformado por fragmentos bien redondeados de rocas ígneas (ácidas) de color morado poco cementado. (C) Brecha sedimentaria constituida por fragmentos subangulosos derivados de las rocas vulcanosedimentarias de la Formación Alisitos, en matriz arcillo-arenosa.	M. Pta. Mezq. Cgim. Mezq.	U4
					+48			
CRETÁCICO		CRETÁCICO SUPERIOR			- Lodolitas, areniscas y conglomerados. Las limolitas son finamente laminadas o masivas, de color gris verdoso a verde parduzco, con intercalaciones arífbricas de arenisca. Las areniscas son de grano fino a medio, de color gris claro o amarillento. Los conglomerados se presentan como lentes en las limolitas y areniscas y están constituidos por fragmentos de metacuarcitas y granodioritas bien redondeados, contenidos en una matriz arenosa con cementante calcáreo.	ROSARIO	U5	
					(220)			
MESOZOICO	CRETÁCICO INFERIOR			- Brechas vulcanosedimentarias y tobas ígneas, con intercalaciones de arenisca y derrames volcánicos, presentan estratificación bien desarrollada.	ALISITOS	U6		
				+500	- Las rocas de la Fm. Alisitos están afectadas por intrusivos granodioríticos y las de la Fm. Rosario lo están por diques de composición intermedia.			
	JURÁSICO SUPERIOR							

NOTAS: Los depósitos cuaternarios no están a escala.  
(\*) Denominación informal

Figura 4.6. Columna estratigráfica del área estudiada (comprendida entre Puerto Nuevo y La Misión de San Miguel) NW de Baja California. Modificado de Sánchez, et. al., 1986.

### 4.3 ALTERNATIVA CERRO EL TOPO PARA EL PHAEB MONTERREY (Factibilidad).<sup>14</sup>

#### 4.3.1 Localización del proyecto

El Cerro el Topo se encuentra en la orilla norte de la ciudad de Monterrey, N.L., (fig. 4.7), donde se aprecia también las vías de acceso y comunicación favorables. Sin embargo, el acceso a la cima del cerro no es posible en vehículo y sólo se puede llegar a las faldas de él.

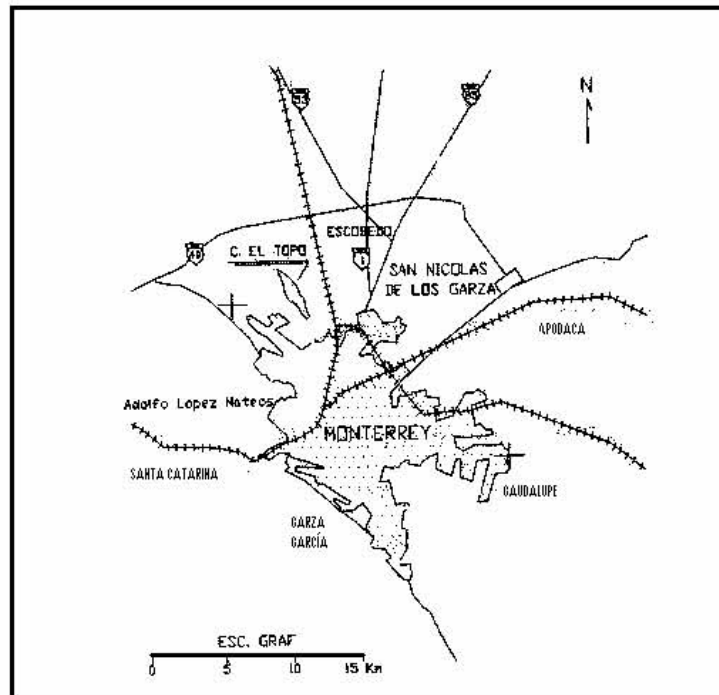


FIGURA 4.7. Localización y accesos

#### 4.3.2 Descripción del proyecto

Es el primer sitio cuyo estudio culmina a nivel de Factibilidad y se pretende aprovechar la elevación del cerro El Topo y proveerse de agua residual tratada de la ciudad de Monterrey.

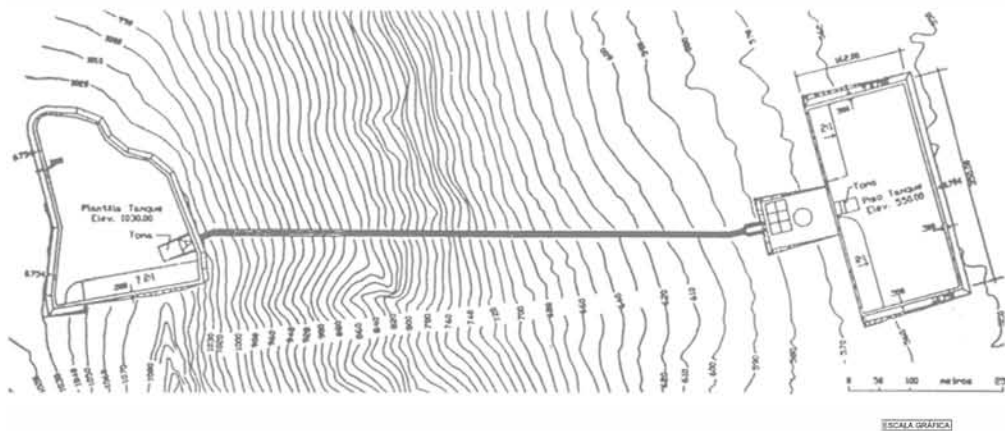
Puede tener una carga media neta de 464.3 m, que puede dar una capacidad instalada de 200 MW mediante el uso de dos turbinas reversibles tipo Francis, con un ciclo de generación diaria de 5.1 horas. El volumen de agua requerido es de 800,000m<sup>3</sup> mas un gasto de algunas decenas de litros por segundo para reponer pérdidas por evaporación.

### *Vaso superior.*

El vaso superior se excavará y construirá sobre el eje de un anticlinal bufante y asimétrico constituido por calizas gruesas de la formación Aurora. El flanco Noreste del sitio puede tener desplazamientos por el echado desfavorable de los estratos, lo cual hace necesario prever el uso de anclaje, ya que en esta parte se proyecta la obra de toma. Existe además una zona de aproximadamente el 20% el área por ocupar a la cota del piso del vaso, cuyo fracturamiento y carsticidad deberán considerarse para posible tratamiento. Para la construcción del vaso superior se habrá de excavar más de 1'000,000m<sup>3</sup> de roca, complementada con la construcción de un muro perimetral de 815m y un bordo de 195m, ambos de 16m de altura. El volumen por almacenar será de 499,730m<sup>3</sup>.

### *Tanque inferior*

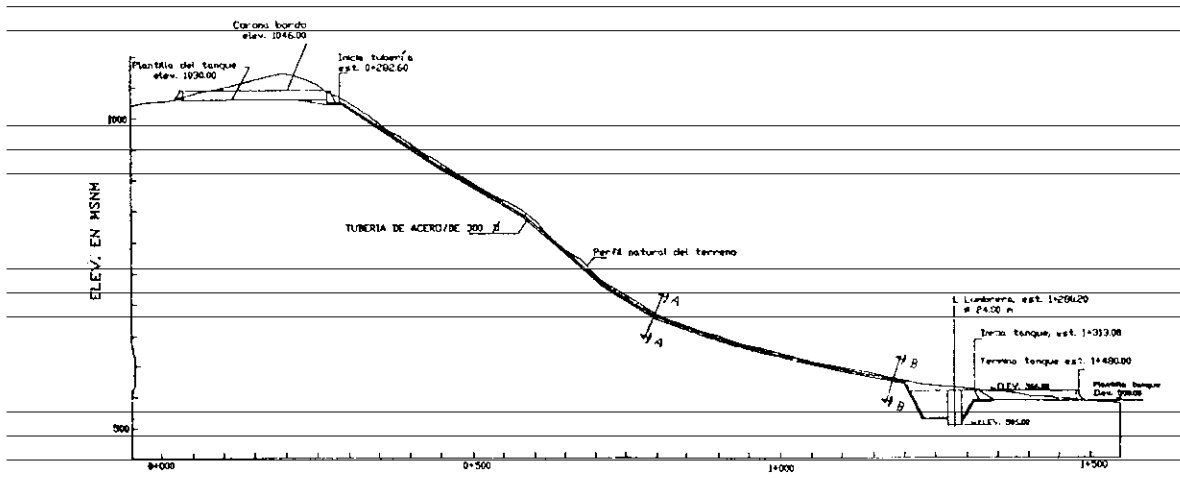
El tanque inferior se proyecta de forma rectangular de 350x162x16 m y una capacidad de 761,250m<sup>3</sup>. El sitio donde se proyecta esta obra tiene una estratigrafía bastante sencilla, pues se tiene una capa de 1m de espesor de material no compacto (aluvión); subyaciendo a este se tiene un depósito de talud. Quedará desplantado sobre la capa de brecha sedimentaria de 32m de espesor.



**FIGURA 4.8.** Planta del proyecto. Vasos superior e inferior.

### *Conducción*

La conducción se plantea superficial en su mayor parte, con tubería de acero de 3m de diámetro interior y longitud de 1,006m, apoyada sobre silletas. Se desplantará sobre calizas de la formación Aurora y sobre la brecha sedimentaria, previo descapote de material intemperizado o sedimentos sin consolidar. En el anteproyecto se ubica la mayor parte en un parteaguas, por lo que el drenaje no será problema para este elemento



**FIGURA 4.9.** Corte longitudinal por el eje de la tubería a presión

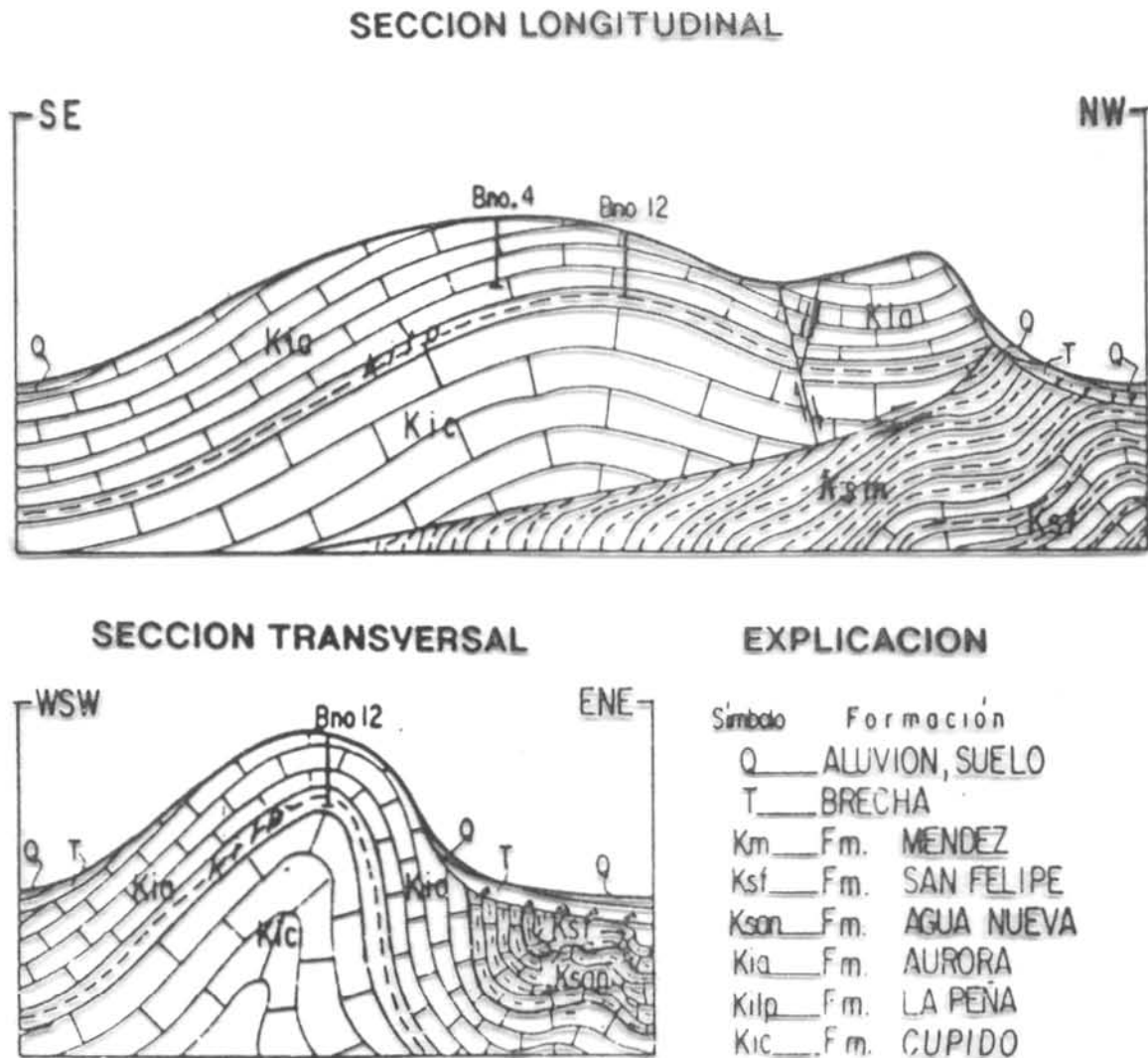
### *Casa de máquinas*

La casa de máquinas se planea ubicar en una lumbreira de 24m de diámetro interior y 60 m de profundidad que alojará dos turbinas reversibles tipo Francis. El sitio para la obra es prácticamente plano y a pie de cerro.

### **4.3.3 Geomorfología:**

El cerro el Topo es un anticlinal asimétrico de unos 7km de largo por 2.6km de ancho, con rumbo NW, buzante al sur, también al norte, pero el buzamiento en esa parte se encuentra truncado por una falla inversa (cabalgadura). En sentido transversal se trata de un pliegue asimétrico con echados casi verticales en el flanco ENE.





**FIGURA 4.10.** Anticlinal El Topo.

#### 4.3.4 Estratigrafía

En la exploración se distinguen dos tipos de rocas, el primero constituido por rocas sedimentarias marinas de edad Cretácica (Formaciones La Peña, Aurora, Agua Nueva, San Felipe y Méndez) y el segundo por rocas sedimentarias de origen continental de edad Terciaria y Cuaternaria (Brecha Sedimentaria y depósitos de talud y aluvión), como se observa en las figuras 4.10 y 4.11.

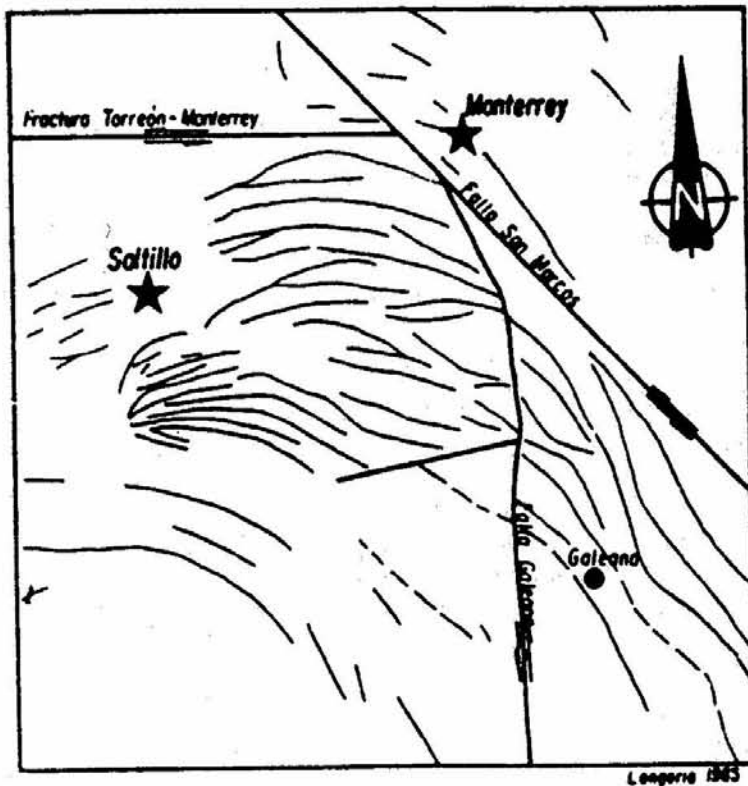
	EDAD	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	UNIDADES	SIMB.	DESCRIPCIÓN
CUAT		2.80		Aurón y Depósito de talud	Qal Qt	Fragmentos calcáreos mal consolidados
TERCIARIO	MIOCENO	13.7		Brecha sedimentaria	Tbs	Fragmentos angulosos de caliza, varían de 10 a 15.0 cm, excepcionalmente mayores de 1.0 m. Bien cementados y con permeabilidad secundaria. Predominan los fragmentos sobre la matriz limonosa roja.
		18.7				Composición parecida, solo que predominan la matriz sobre los fragmentos. No está cementada y tiene permeabilidad primaria.
CRETACICO SUPERIOR	CAMPANIANO MASTRICHTIANO	?		F. Méndez	Ksm	Lutitas y margas pardas, estratos delgados y laminares. Fácil de intemperizar y erosionar.
	CONIACIANO SANTONIANO	8.0		F. San Felipe	Kssf	Caliza arcillosa gris amarillento en estratos delgados con alternancia de lutitas laminares muy delzables. Se caracteriza por horizontes muy bentoníticos. Tiene un espesor de 8.00 m muy alterado.
		30.0				
	TURONIANO	6.0		F. Agua Nueva	Ksan	Caliza arcillosa gris oscura, compacta, de estratificación delgada, con intercalaciones de lutitas laminares carbonosas, tiene pirita diseminada y es muy fisil. Tiene un espesor de 6.0 m intemperizado y alterado. En general es una roca noderadamente competente.
		32.5				
ALBIANO CENOMANIANO	19.0	Aurora	Kia	Caliza gris oscura, dura y compacta, con estratificación media a masiva, fracturada sobre todo los primeros 19.0 m contiene abundantes fósiles. Superficialmente se observa corsticidad y a profundidad se localizaron algunas conernas pequeños.		
132.0						
CRET. INFERIOR	APTIANO	24.0	F. La Peña ?	kilp	Calizas arcillosas amarillentas, compactas, con intercalaciones de lutitas calcáreas grises. Tienen estratificación delgada y laminar. ROB superior a 90%. No se cortó su base.	

Modificado de Vergas et al, 1992

FIGURA 4.11. Estratigrafía.

### 4.3.5 Sismicidad y riesgo sísmico

El evento tectónico clave en el área corresponde al cabalgamiento de rocas jurásicas y del Cretácico inferior sobre las del Cretácico Superior, empujadas del suroeste hacia el noreste contra las Islas de Coahuila y San Carlos, dando lugar con esto a la formación o reactivación de tres grandes estructuras que son las Fallas San Marcos y Galeana, así como a la fractura Torreón-Monterrey. La confluencia de estas estructuras da lugar a un "nudo" tectónico, al norte del cual se encuentra el cerro El Topo (fig. 4.12).



**FIGURA 4.12.** Principales estructuras cercanas a Monterrey.

De manera general el proyecto se encuentra en una zona de baja sismicidad, de acuerdo con la regionalización que realizó Esteva Maraboto. A partir de los años 80 se instrumentó la zona de estudio, y al consultarse el Servicio Sismológico Nacional se encontraron los sismos registrados en un radio de 200 km a partir del sitio. Los resultados se encuentran en la tabla siguiente:

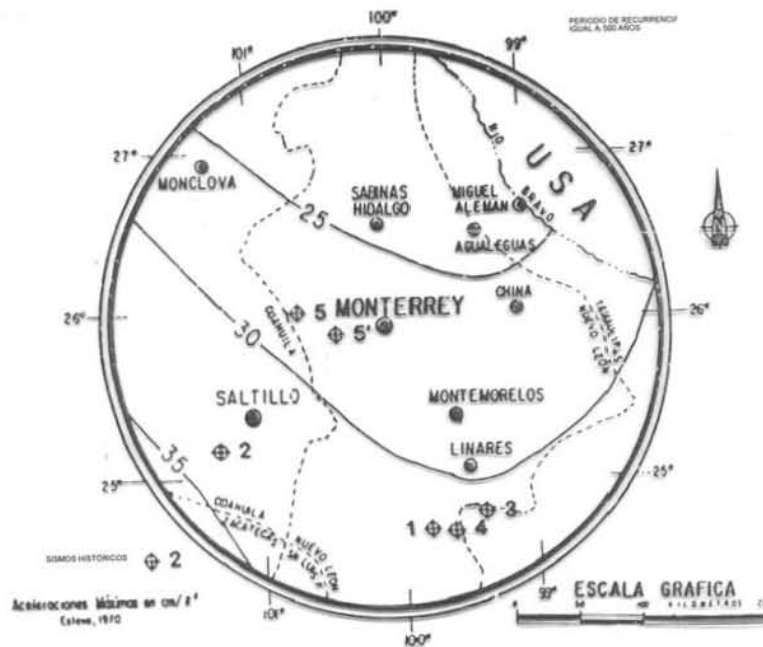
Fecha	Lat °	Long °	Prof km	MAG	DIST km	Aceleración (Esteva, 1970) g	Aceleración (Campbell, 1981) g	Núm
800204	24,7 5	99,77	0,00	4,00	129.7 9	0.0012	0.0013	1
820321	25,1 8	101,25	33,00	4,40	113.6 0	0.0022	0.0001	2
860226	24,8 0	99,46	10,00	4,40	142.4 7	0.0015	0.0001	3
860608	24,7 5	99,66	33,00	4,22	135.1 7	0.0014	0.0001	4
911116	25,9 1	100,42	15,00	4,00	15.50	0.0187	0.0013	5
901115	Se detectó por periódico local (no se obtuvieron los registros)							

**Tabla 4.1.** Sismos recientes registrados en la zona.

Los sismos 1,3 y 4 se localizaron cerca de Linares, N.L., y se reporta en diarios locales que los daños fueron cuarteaduras de casas, así como vidrios quebrados de ventanas y puertas, por lo que la intensidad asignada sería de VI (Mercalli modificada). El sismo 5 se localiza cerca de Monterrey, con una magnitud de 4.0 en la escala de Richter, a una profundidad probable de 15 km. Del sismo 2 no se tiene información adicional a la que se muestra en la tabla.

En la fig. 4.13 se muestra la ubicación de los sismos registrados y las curvas de aceleraciones máximas en un periodo de recurrencia de 500 años. El sitio de estudio se encuentra en la parte norte de la figura, donde se tiene una disminución en los valores de las curvas de máxima aceleración. La figura se realizó sin tomar en cuenta las características tectónicas de la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, solamente las del Eje Neovolcánico y además no se ha incorporado la información de los últimos 14 años, en los que se han registrado sismos.

Los sismos ocurridos se consideran de magnitud intermedia y aunque no han provocado daños significativos, deberán tomarse en cuenta para fines de diseño de obras futuras.



**FIGURA 4.13.** Aceleraciones máximas del terreno

Para determinar el potencial sísmico del sitio en estudio se elaboró el plano estructural que se muestra en la figura 4.14, con base en planos de geología superficial de la CFE, cartas del INEGI e información bibliográfica. En este plano se han identificado aquellas fallas que pueden generar un sismo de importancia para la obra. Las estructuras fueron numeradas del I al XVIII y a cada una de ellas se les asignó un sismo máximo creíble con una aceleración máxima en caso de romper alguna de las estructuras.

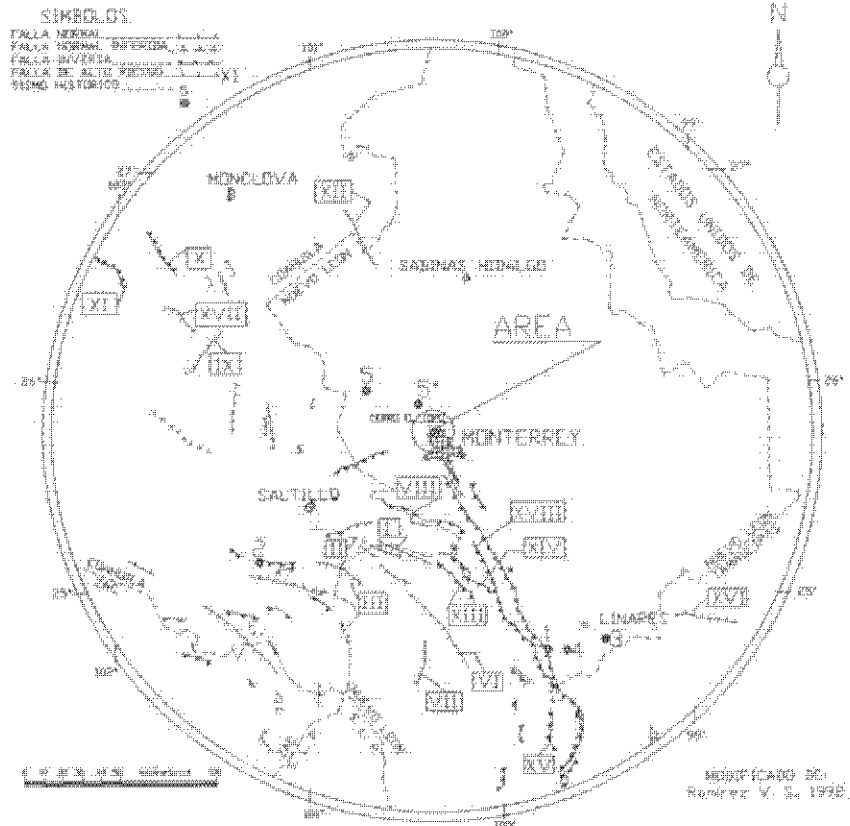


Figura 4.14. Plano estructural del sitio.

Para el cálculo de las máximas magnitudes y aceleraciones creíbles, se extrapolaron sobre las fallas los máximos sismos creíbles, hasta el punto más cercano al proyecto, para estimar los movimientos que afectarían al sitio en caso de que se reactivara la falla por efecto de un sismo. Se usó una serie de funciones que relacionan magnitud, distancia y aceleración.

FALLA	DIST. MINIMA (KM)	LONGITUD (KM)	MAGNITUD	ACELERACIÓN (g)	ACELERACIÓN (g)
*	22	200	6.90	0.1416	0.0010
*	17	264	7.26	0.2366	0.0017
I	69	27	4.29	0.0043	0.0002
II	67	22	4.02	0.0036	0.0002
III	85.5	34	4.59	0.0040	0.0002
IV	102.5	40	4.80	0.0035	0.0001
V	146	52	5.14	0.0026	0.0001
VI	85	51	5.12	0.0062	0.0002
VII	109	25	4.19	0.0019	0.0001
VIII	42.5	43	4.90	0.0138	0.0005
IX	120	32	4.51	0.0022	0.0001
X	156	29	4.38	0.0012	0.0001
XI	177	27	4.29	0.0009	0.00009
XII	92	34	4.59	0.0036	0.0002
XIII	67	30	4.43	0.0051	0.0002
XIV	59	43	4.90	0.0089	0.0003
XV	157	25	4.19	0.0010	0.0001
XVI	158	37	4.70	0.0016	0.0001
XVII	135	22	4.02	0.0012	0.0001
XVIII	60	94	5.91	0.0196	0.0003

Tabla 4.2.

En las fallas San Marcos y Galeana (señaladas con asteriscos), se obtuvieron magnitudes de 6.9 y 7.26, siendo las mayores. Sin embargo, estos resultados deben considerarse con reserva, ya que el tiempo de observación no tiene la suficiente representatividad.

#### **4.3.6 Geología del sitio para vaso superior**

El sitio para vaso superior se encuentra en el extremo NW del cerro El Topo, con una pendiente descendente y suave en este sentido. En sección perpendicular la cima es redondeada y gradúa hacia los flancos hasta una inclinación de 50°.

El diseño civil prevé que el vaso se creará con el borde que resulte del corte hacia la parte sur y se completará con un muro perimetral de 815 m de longitud por 16 m de alto.

#### **Estratigrafía**

El vaso superior quedará desplantado sobre la Formación Aurora, constituida por calizas muy compactas, en estratos medianos a gruesos, con espesor promedio de 63cm y forma irregular. Al fresco tienen coloración gris a gris oscuro y meteorizan a gris claro. En esta unidad son frecuentes los microfósiles en algunos horizontes, estructuras de disolución tipo “lapiaz”, nódulos de pedernal y estilolitas paralelas a la estratificación. Las capas superficiales se hallan afectadas por fracturamiento multidireccional, normalmente relleno de arcilla o suelo residual y ocasionalmente sellado por calcita, encontrándose casos de fracturas profundas y abiertas. El espesor determinado en este sitio es de aproximadamente 60 m.

Los contactos adyacentes a esta unidad son concordantes; limita en su base con la formación La Peña por medio de un contacto nítido, en tanto que sus capas superiores varían gradualmente a la Formación Agua Nueva, esto último observado en Arroyo Grande.

La mayor parte del vaso superior se alinea con el eje del anticlinal, y por tanto, en esta porción los estratos son casi horizontales o con una leve inclinación hacia el NW, dirección hacia el cual buza el pliegue. Hacia los costados es diferente; el flanco NE presenta capas con inclinaciones de 30 a 62°, mientras que en el lado contrario (SW) son de 15°, lo que da la asimetría al plegamiento.

#### **Estratificación**

Utilizando la proyección de Shmidt se realizó un diagrama estructural donde se comprueba que existe uniformidad en las inclinaciones de los estratos en el flanco suroeste y una mayor variación de los echados en el flanco Noreste.

Uno de los problemas que se prevén y que está relacionado con la estratificación, consiste en que el bordo perimetral se apoyará en el extremo NE sobre echados

con posición desfavorable por lo cual posiblemente será necesario instalar algún anclaje o tratamiento adicional, ya que además del bordo perimetral, se planea ahí la construcción de la obra de toma.

### Fracturas

Para su estudio fue necesario agrupar las fracturas en tres tipos:

- a) menores a 1.0 m de longitud
- b) de 1.0 a 5.0 m de longitud
- c) mayores a 5.0 m de longitud

De los 729 datos obtenidos en el vaso superior, la mayoría pertenecen al tipo B (519 datos), con aberturas hasta de 20cm, con un promedio de frecuencia de 2 f/m, rellenas de suelo residual y pared ondulada.

En menor proporción se encuentran fracturas selladas por calcita, con planos casi verticales y aberturas de 15 a 20cm. En su mayoría la abertura de las fracturas es superficial y aumentada por disolución.

Con 958 fracturas levantadas en el sitio del vaso superior y línea de conducción se realizó el análisis polar usando el criterio de Schmidt, el diagrama correspondiente denota gran dispersión de polos (fig. 4.15) y el consecuente diagrama de densidad (fig. 4.16) muestra tres grupos o sistemas que representan el fracturamiento en este sitio, los cuales se definen de la siguiente forma:

- I. NW7°/83°NE
- II. NE52°/80°SE
- III. NE83°/86°SE

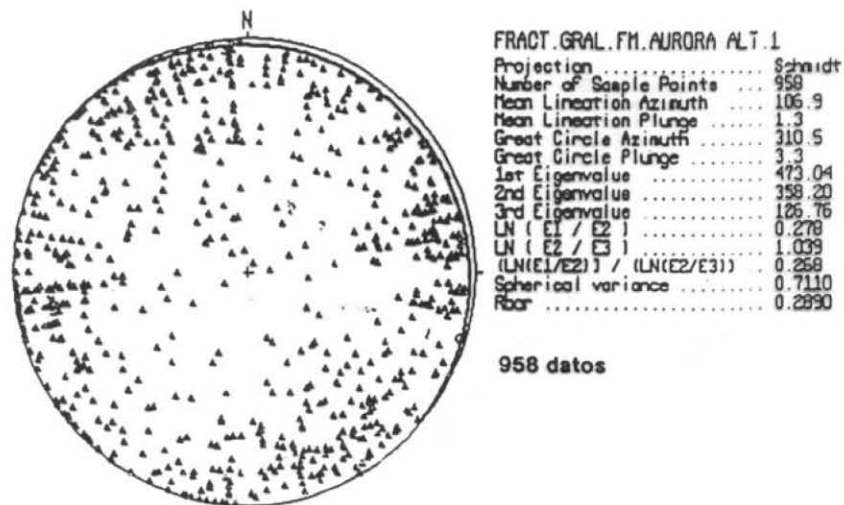
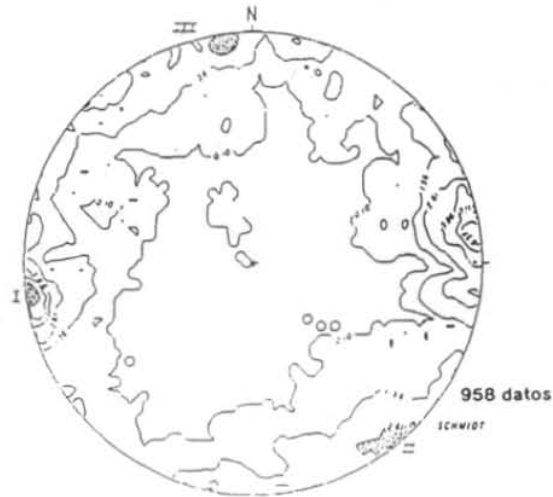
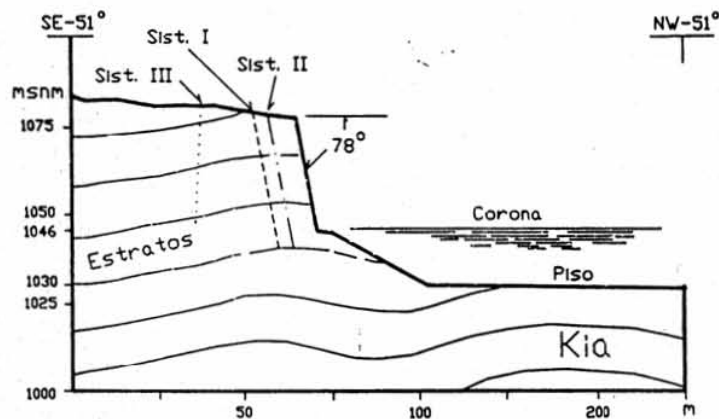


FIGURA 4.15. Fracturamiento vaso superior. Diagrama estereográfico de polos.



**FIGURA 4.16.** Fracturamiento vaso superior. Diagrama de frecuencia de polos.

En la figura 4.17 se observa la sección máxima perpendicular al corte propuesto, así como los diferentes sistemas de discontinuidades que afectan al macizo rocoso, con lo cual se constata que el corte no presentará problemas, ya que el único sistema que puede provocar deslizamiento de bloques es el sistema III, el cual es el menos importante en cuanto a frecuencia.



**FIGURA 4.17.** Máximo corte para alojar el vaso superior

#### 4.3.7 Geofísica en el sitio para vaso superior

El tanque superior quedará sobre las calizas de la formación Aurora, la cual para efectos de geofísica se distingue como U5. Las subdivisiones corresponden a la U5a, U5b y U5c.

Los parámetros obtenidos para cada una de ellas son los siguientes:

**U5a.** Tiene relación con la parte somera y presenta alto fracturamiento (roca relajada), cuyo espesor abarca de 0.90 a 7.5 m. Las velocidades varían entre 0.64



y 1.48 km/s y las resistividades de 11<sup>a</sup> 58 ohm-m, lo cual puede indicar que las fracturas se encuentran rellenas de material fundamentalmente arcilloso.

**U5b.** Calizas moderadamente fracturadas, localizadas por lo general bajo la unidad anterior, cuyo espesor varía de 2.0 a 16.7 m, con velocidades compresionales de 2.4 a 3.6 km/s, que se asocian a una roca de regular a buena calidad, con algo de alteración, dados sus valores de resistividad de 110 a 709 ohm-m.

**U5c.** Se trata del nivel correspondiente a la caliza inalterada de muy alta compacidad, donde fueron obtenidas velocidades compresionales de 4.39 a 6.9 km/s y resistividades de 4,196 a 6,994 ohm-m. Estos datos físicos denotan buenas perspectivas de consistencia para alojar el tanque superior. De acuerdo al anteproyecto, la plantilla del tanque quedaría alojada en esta unidad, excepto la porción noreste, donde quedaría en las unidades U5a y U5b (figura 4.18)

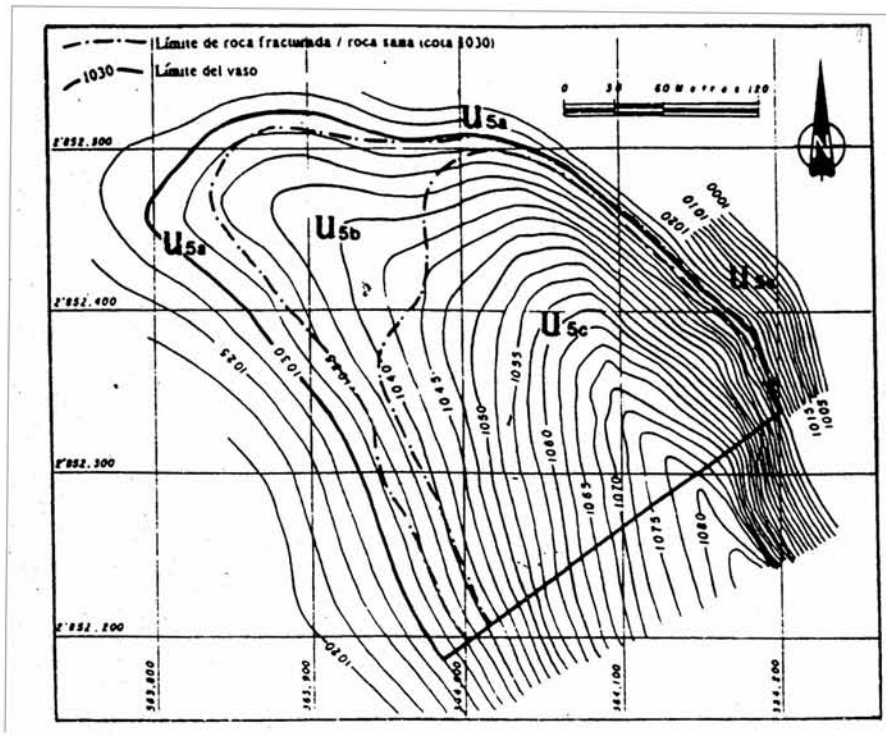


FIGURA 4.18. Unidades geofísicas para el vaso superior.

#### 4.3.8 Exploración directa en el sitio para vaso superior

El sitio para el vaso superior se exploró con los barrenos 10 y 12 (fig. 4.19). El barreno 10 llegó a una profundidad de 58.9 m (fig. 4.20), cortando sólo rocas de la formación Aurora, con un tramo fracturado de 10.0 a 15.3 m; la mayor parte de las rocas varían de sanas a poco fracturadas, con RQD de 96 a 94%. Existen discontinuidades abiertas que ocasionaron un ramo altamente permeable de 13.20 a 16.20 m y otro permeable de 31.50 a 37.5m, aunque toda esta porción es lo que

se va a excavar hasta la profundidad de 40.63m. De este punto hasta 58.9m la roca es de excelente calidad y prácticamente de nula conductividad hidráulica.

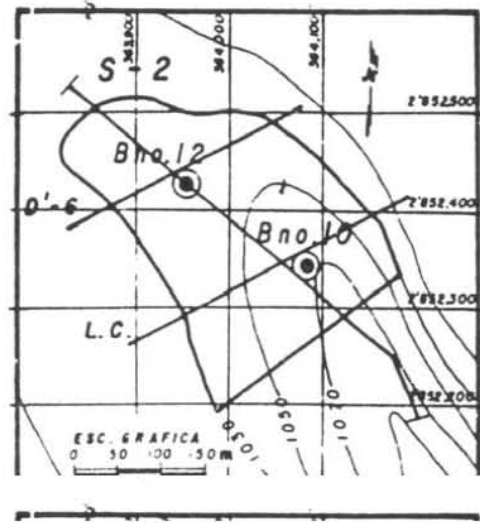


FIGURA 4.19. Localización de barrenos en vaso superior

El barreno 12 (fig. 4.21) cortó 50.2 m de calizas de la Formación Aurora; de esta profundidad hasta el final del pozo (74.0 m) se cortaron calizas arcillosas de estratos delgados correspondientes a la Formación La Peña. En este barreno dentro de la Formación Aurora se cortó una caverna de 31.65 a 34.0 m de profundidad, aproximadamente 24 m debajo de lo que será el piso del tanque. El tramo encima de la caverna hidráulicamente varía de conductivo a muy conductivo al acercarse a la caverna. Debajo de ella no se pudo hacer ensayos de permeabilidad, por lo que sólo es posible suponer que cuando menos los 10 primeros metros deben ser conductivos.

Con los parámetros de RQD, resistencia a la compresión simple, espaciado de juntas, estados de las fisuras y profundidad del NAF, se hizo una clasificación siguiendo el método CISR debido a Bieniawski, encontrándose que la roca corresponde a la clasificación I, que pertenece a una "roca muy buena", pero considerando un ajuste en la valuación por orientación de fracturas, se tiene una valuación de -6 y -25 para uso de taludes, los cuales aplicados al valor total anterior, hacen que le corresponda la misma clasificación I y también la II, que concierne a una "roca buena".

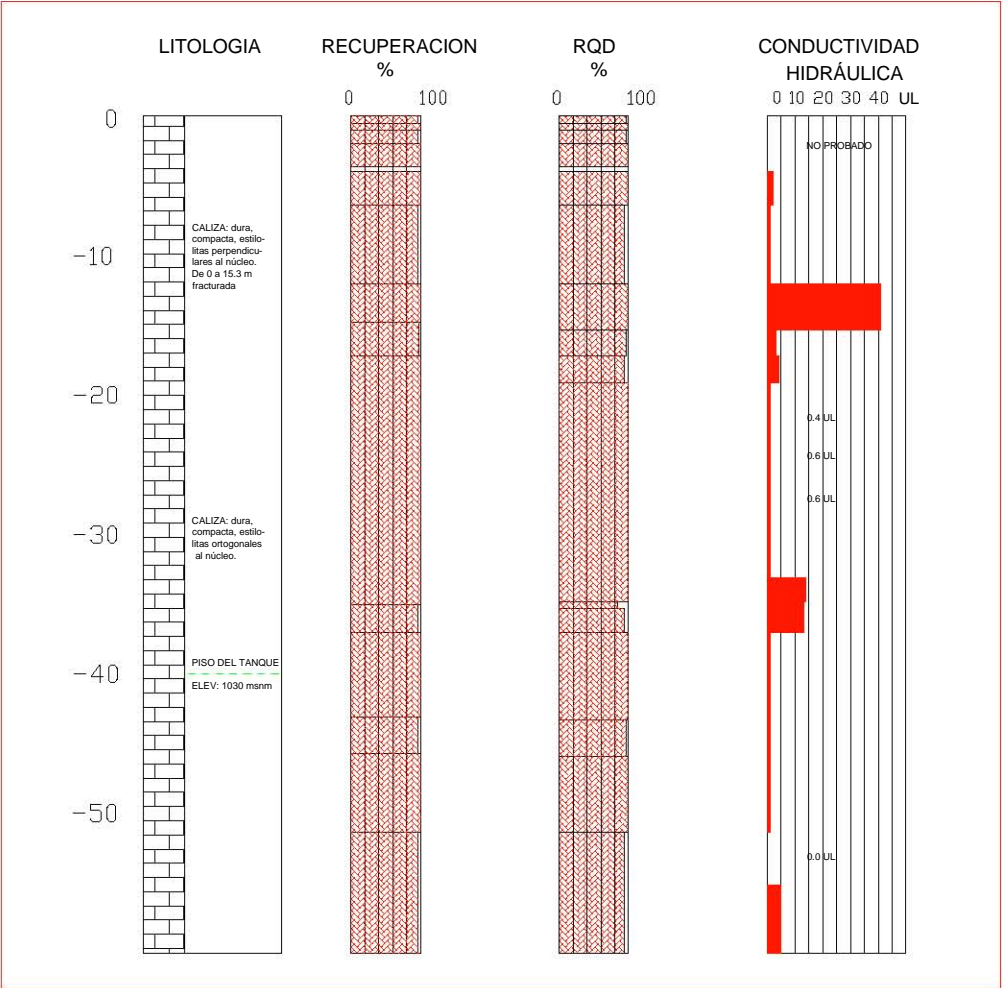


FIGURA 4.20. Perfil del barreno 10

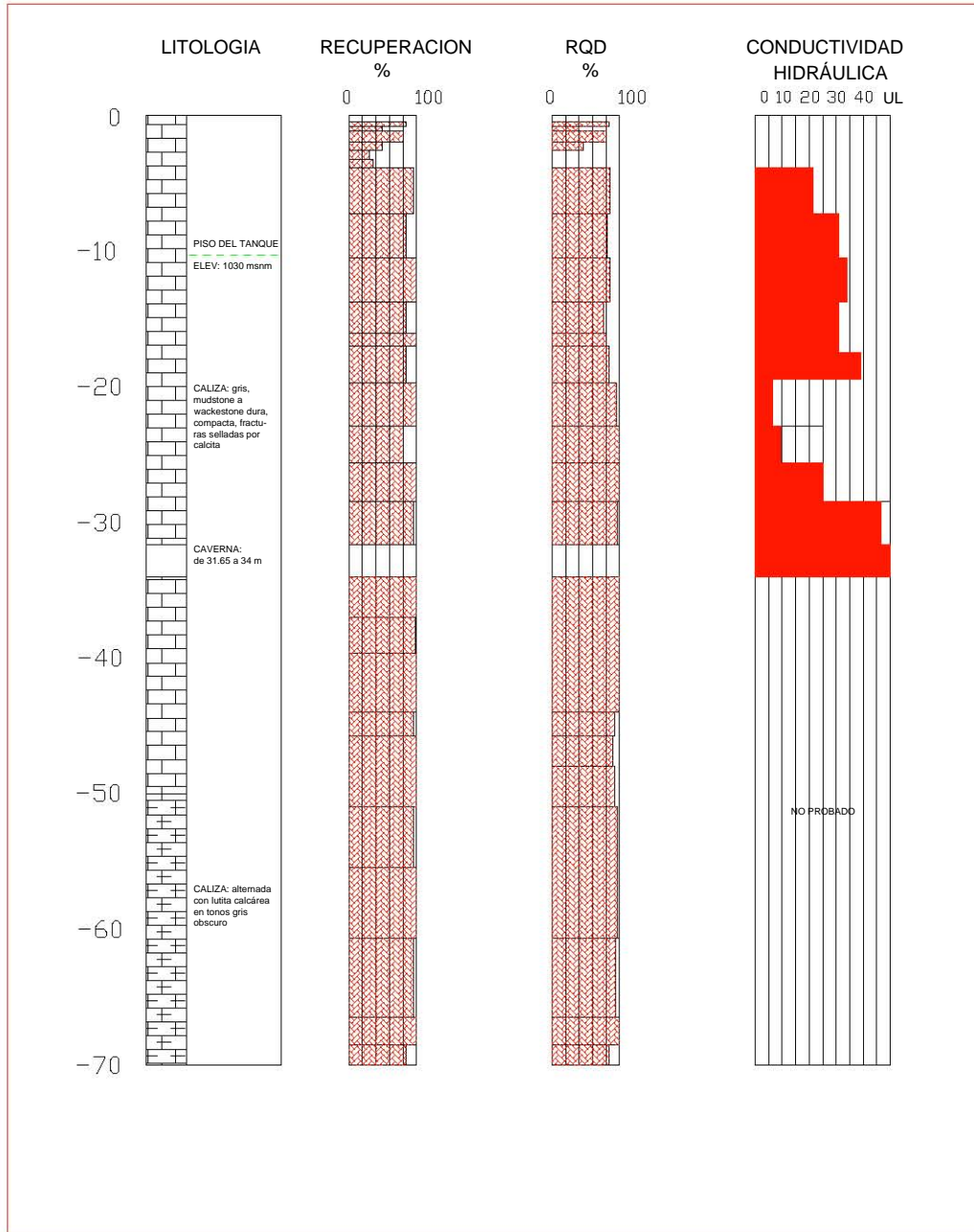


FIGURA 4.21. Perfil del barreno 12

## CONCLUSIONES

Las Centrales Hidroeléctricas de Acumulación de Energía por Bombeo (CHAEB), son una fuente alterna de generación de energía eléctrica, y en el futuro inmediato será necesario instalar algunas, sobre todo en el norte del país, donde se tiene una demanda importante, además, se puede exportar la energía a las maquiladoras de Estados Unidos que se encuentran cerca de la frontera, con lo cual se mejoraría la economía nacional.

La operación de este tipo de plantas presenta características que van de acuerdo con la política que se tiene en la actualidad con respecto a la ecología, al no modificar o agredir el ambiente que las rodea, tal como sucede con las centrales hidroeléctricas.

En cuanto a las características de una CHAEB, éstas son similares a las de una central hidroeléctrica, tanto en sus elementos mecánicos como en los físicos. Una característica importante y a la vez limitante, es la relación longitud/altura, ya que para tener un desempeño eficiente, es necesario tener una caída de varios cientos de metros en una longitud relativamente corta. Esto se puede encontrar en cerros con pendientes abruptas; los vasos o estanques deben ser impermeables debido a la escasez de agua en los sitios donde se proyectan, aunque el agua se puede obtener de fuentes diversas, desde arroyos hasta aguas residuales. Además presentan una gran variedad en cuanto a la capacidad de producción de energía eléctrica, lo cual nos hace pensar que poblaciones pequeñas podrían beneficiarse con una central de capacidad de 1 MW, por ejemplo.

Desde que se tienen etapas tempranas de los estudios geotécnicos, como en la de prefactibilidad, se caracterizan y descartan alternativas con ayuda de los mapas de geología regional. Una vez determinadas las posibles soluciones, se planea la campaña de exploración exhaustiva que se llevará a cabo en los sitios donde se emplazarán las obras. En esta etapa, se localizan bancos de materiales, siendo su localización cercana a la obra un factor demasiado importante como para ser relegado, dado que si no se tienen materiales se desecha la propuesta por los elevados costos que implica el acarreo hasta el sitio; estructuras importantes que puedan afectar la central (fallas, pliegues, planos de contacto...), la resistencia del macizo rocoso, estabilidad, permeabilidad, sismicidad, condiciones litológicas, así como carsticidad si se tienen calizas, son factores igualmente determinantes en el transcurso de la evaluación de diferentes sitios.

La clasificación y caracterización del macizo donde se desplantará la obra son labores que se deben seguir durante todo el desarrollo del proyecto, debido a que la exploración nos ofrece características puntuales de la roca que deben ser verificadas constantemente. En los capítulos anteriores se dieron parámetros mecánicos de rocas que han sido desarrollados a lo largo de mucho tiempo por bastantes investigadores alrededor del mundo. Estos parámetros pueden ser útiles para el ingeniero, si bien el criterio y la experiencia personal son los mejores

aliados en la ingeniería, y particularmente en la geotecnia, como lo expresan autores reconocidos en esta área.

Los estudios geofísicos son elementos que permiten investigar las características y extensiones de los diferentes estratos de material; mediante correlaciones entre los ensayos de geofísica y la exploración directa podemos realizar perfiles y mapas geotécnicos que sean útiles en etapas avanzadas del proyecto.

En nuestro país se tienen regiones sísmicamente activas, por lo que cualquier presa que proyectemos estará sujeta a revisión por sismo y esto nos obliga a conocer la situación que guarda nuestro proyecto con las regiones sísmicas en las que está dividida la república, además de investigar si se tiene cerca alguna falla que pueda considerarse activa, en cuyo caso será desechado el proyecto. En nuestro país se han realizado estudios en sitios como el norte de la república, donde la demanda está en constante crecimiento debido a que se instalan industrias en esta zona más que en cualquier otra, por la cercanía con los Estados Unidos. Es en lugares con demanda creciente y en zonas aisladas donde se tiene un potencial que debe ser aprovechado, ya que es un hecho que las fuentes tradicionales como los hidrocarburos están a punto de entrar en una fase crítica, al ser escasos y muy contaminantes. Una ventaja importante de las Centrales Hidroeléctricas de Acumulación de Energía por Bombeo es que no se requiere un aporte constante y voluminoso como en las centrales hidroeléctricas convencionales, por lo cual no se altera el suministro de agua y los cauces de los ríos, simplemente se requiere reponer el agua perdida por evaporación y por filtración, si ésta aparece. Por último, se presentan tres proyectos que han sido elaborados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a distintos niveles como ejemplos para ilustrar este trabajo.

Con los ejemplos presentados y el trabajo en general, no se pretende dar un manual de investigación, más bien se pretende dar un poco más de difusión a este tipo de centrales para impulsar su desarrollo en el país y ser competitivos en el ámbito internacional, además de que se bajaría el consumo de hidrocarburos utilizados en la generación de electricidad, ya que en la actualidad representan casi el 50% de las fuentes (de acuerdo a datos de CFE), muy por encima de la energía geotérmica y la hidráulica. Al bajar el consumo de estos combustibles, se dejaría de contaminar y seríamos un poco menos dependientes de los hidrocarburos.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Benhumea León, Mario; Adolfo Vázquez Contreras. **Estudios Geofísicos del Valle de México**. CFE. México, 1988.
- 2.- Chávez Aguirre, José María. **Apuntes de Mecánica de Rocas**. Inédito.
- 3.- González de Vallejo, L.I. **Ingeniería Geológica**. Editorial Prentice-Hall. Madrid, 2002.
- 4.- Fundación ICA. **40 años de investigación y práctica en geotecnia, artículos históricos. Tomo III "Diseño"**. México, 1997.
- 5.- Hoek, E., E.T. Brown. **Excavaciones subterráneas en rocas**. Traducción por Raymundo Dely. Editorial Mc Graw-Hill. México, 1985.
- 6.- Juárez Badillo, Eulalio; Alfonso Rico Rodríguez. **Mecánica de Suelos Tomo II**. Editorial Limusa. México, 1990.
- 7.- Raúl J. Marsal, Daniel Reséndiz Núñez. **Presas de Tierra y Enrocamiento**. Editorial Limusa. México, 1983.
- 8.- Ruiz Vázquez, Mariano. **Geología aplicada**. Editorial Limusa. México, 2001.
- 9.- Sánchez Pérez, Juan. **Apuntes de Diplomado en Energía y energéticos**. FES Acatlán. Inédito. México, 2003.
- 10.- Tarbuck y Ludgens. **Ciencias de la Tierra, una introducción a la Geología Física**. Editorial Prentice-Hall. México, 2000.
- 11.- Varios autores. **Cuadernos de posgrado. Serie B-5, Geotecnia**. Ediciones Acatlán. México, 1995.
- 12.- Varios autores. **IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, sesión 1**. S.M.M.S. México, 1978.
- 13.- Varios autores. **Presas de almacenamiento. Conferencia internacional**. S.M.M.S. México, julio 9 y 10 de 1998.
- 14.- Vargas Badillo, José. Jesús E. Gómez Sosa. **Factibilidad geológica de la alternativa Cerro El Topo para el PHAEB Monterrey, N. L.** CFE. México, 1994.
- 15.- Varios autores. **Construcciones en roca**. C.I.C.M. México, 1965.
- 16.- Varios autores. **Estudios geológicos en Proyectos de Acumulación de Energía por Bombeo en la Región de Monterrey, N.L.** CFE. México, 1991.