



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Informe del Proyecto de Presa
en el Estado de Nuevo León,
Estudio Geológico-Geotécnico**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Gonzalo Condado Bernal

ASESOR DE INFORME

M.ED. Miguel Ildelfonso Vera Ocampo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	3
II. PROYECTO DE CORTINA DE LA PRESA	3
III. MARCO GEOGRÁFICO	4
III.1 Localización	4
III.2 Clima	5
III.3 Sismicidad	5
III.4 Fisiografía	7
IV. GEOLOGÍA REGIONAL	7
V. GEOLOGÍA LOCAL	9
V.1 Geología estructural	11
VI. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	14
VI.1 NUEVA CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA	16
VI.1.1 Piezómetros	17
VI.2 ENSAYES DE PERMEABILIDAD	17
VI.2.1 Ensayes Lefranc	18
VI.2.2 Ensayes Lugeon	19
VI.2.3 Resultados obtenidos	20

VII. ESTUDIO PETROGRÁFICO	23
VIII. ENSAYES DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE ROCA	24
VIII.1 Ensayes de Compresión Simple	25
VIII.2 Ensaye de Tensión Indirecta en Prueba Brasileña	26
VIII.3 Resultados Obtenidos de los Ensayes	27

ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

I. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de cubrir el abasto de agua para el Área Conurbada de la Zona Metropolitana de Monterrey y luego de tener más de 25 años de no construirse una presa de gran magnitud, se contempla el desarrollo de nueva infraestructura que permita garantizar el abasto de agua potable para los habitantes de 24 municipios con una población cercana a los 4.8 millones de habitantes.

En los meses de agosto a noviembre de 2018 se elaboró un estudio geológico – geotécnico de viabilidad para el desarrollo de una cortina de Concreto Compactado con Rodillo (CCR); y para esto, se contempló y revisó la campaña de exploración ejecutada a fines de los años setentas e inicios de los ochentas realizada por el Gobierno Federal donde se incluyó información geológica y geotécnica del área de estudio. En dicha campaña se analizaron dos propuestas de eje perforándose un total de 54 sondeos, de los cuales 28 sondeos se realizaron en el Eje I y 26 sondeos en el Eje II, con un total de 2,275.40 metros de barrenación ejecutada. La perforación de los sondeos fue vertical incluyendo la ejecución de pruebas de permeabilidad en prácticamente todos los tramos perforados.

Se ejecutó inicialmente un levantamiento topográfico para continuar con una nueva campaña de exploración que contempló el reconocimiento geológico de superficie y una exploración geotécnica que incluyó la perforación de barrenos sobre el eje de la cortina, ejecución de pruebas de permeabilidad tipo Lefranc y Lugeon, instalación de piezómetros, pruebas de laboratorio y pruebas in situ para roca intacta.

II. PROYECTO DE CORTINA DE LA PRESA

Se contempla una presa de CCR (concreto compactado con rodillo), con una cortina a la elevación de 352 msnm, para un nivel máximo de embalse en la elevación 351.39 msnm (NAME), nivel máximo de operación (NAMO) 347 msnm, elevación de parapeto de corona de 353.50 msnm, donde el mismo proyecto contiene un vertedor libre entre los Km 1+150 al 1+500 con una elevación de 347 msnm, con una obra de toma en el Km 1+120.

La cortina iniciará en el Km 0+000 con una orientación NW-SE 16° hasta el banco de nivel dos (Km 1+548.25), posteriormente se tendrá de rumbo NE-SW 31° hacia el banco de nivel tres (Km 1+905.44), para finalizar con ésta misma dirección en el Km 1+915, para una distancia total de 1,915 m. La cortina tendría una altura máxima en la sección vertedora de 47.40 m desde el desplante y una altura máxima en su sección no vertedora de 45.39 m también desde el desplante.

La presa incluirá obra de desvío, teniéndose un embalse de aproximadamente 8.1 km de largo por 4 km de ancho con un área aproximada de 2,357 ha.

III. MARCO GEOGRÁFICO

III.1 Localización

La presa se ubicará al oriente del estado de Nuevo León, al norte de la ciudad de Linares.

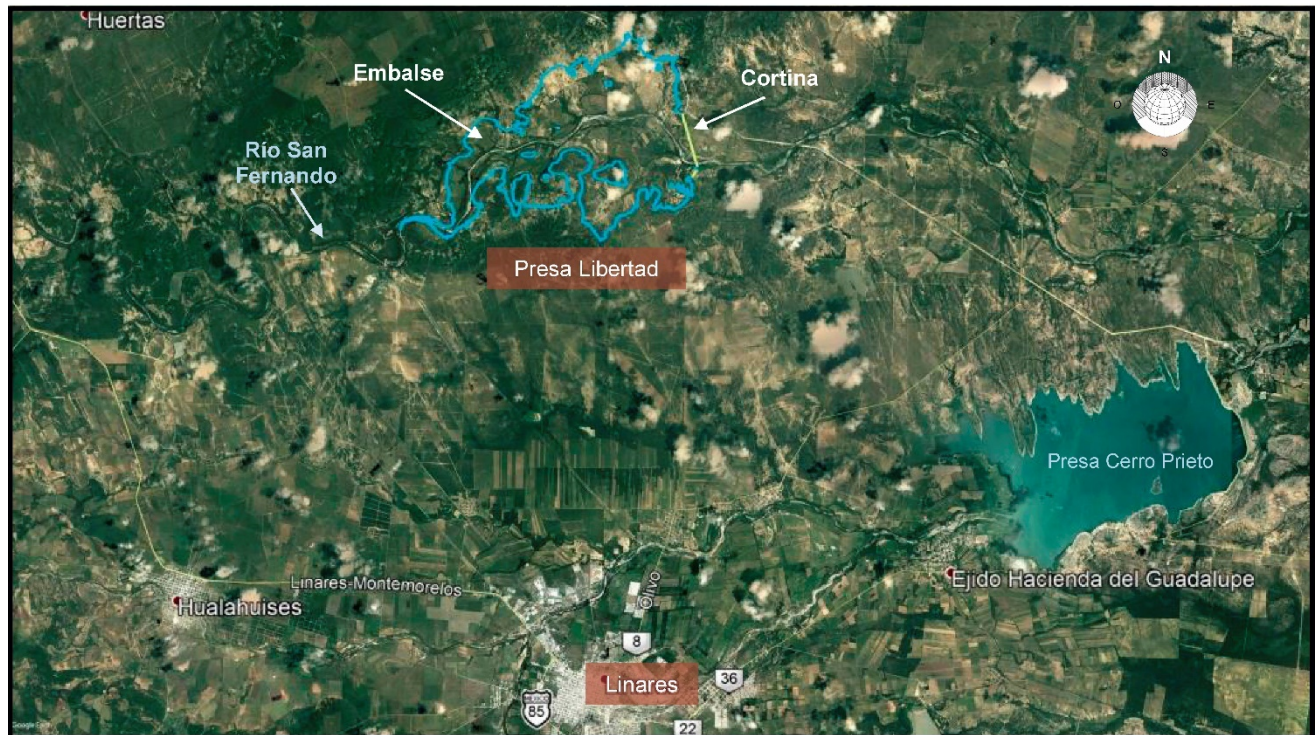


Figura 1. Localización de la zona de estudio.
Modificado de Google Earth, 2018

III.2 Clima

Con base en la clasificación climatológica propuesta por Köppen (1900), modificada por García (1998) para la República Mexicana el clima presente en la zona de estudio es del tipo (A)C(wo)x', Semicálido subhúmedo del grupo C, con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C, precipitación del mes más seco menor de 40 mm, lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.

III.3 Sismicidad

De acuerdo con la regionalización sísmica realizada a partir de los catálogos de sismos de la República Mexicana y que aparecen en los registros históricos; así como de los registros de aceleración del suelo de algunos de los grandes temblores ocurridos desde el siglo pasado, la zona de estudio se ubicada en la Zona A, donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos 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. Esta regionalización se ha venido actualizando y a la fecha el mapa continuo de aceleraciones máximas de México obtenidas del programa PRODISIS v.4.1 del Manual de Obras Civiles de CFE de 2015, muestra los valores para obtener un espectro de diseño en roca para peligro uniforme de manera más específica para la zona donde se ubicará la presa.

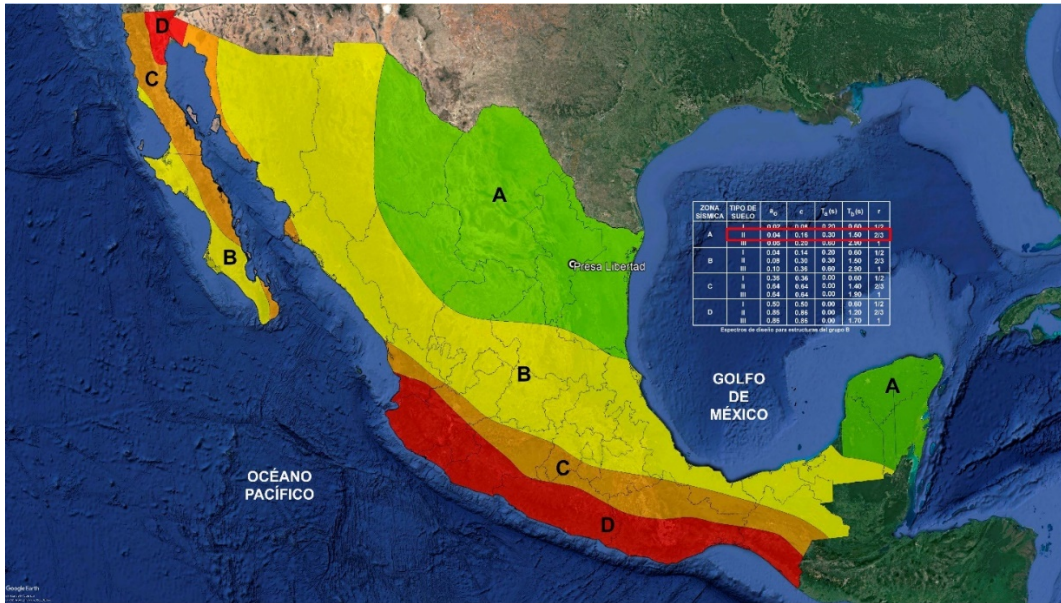


Figura 2. Sismicidad en la República Mexicana.
 Modificado del Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, CFE, 1993 y Google Earth 2018

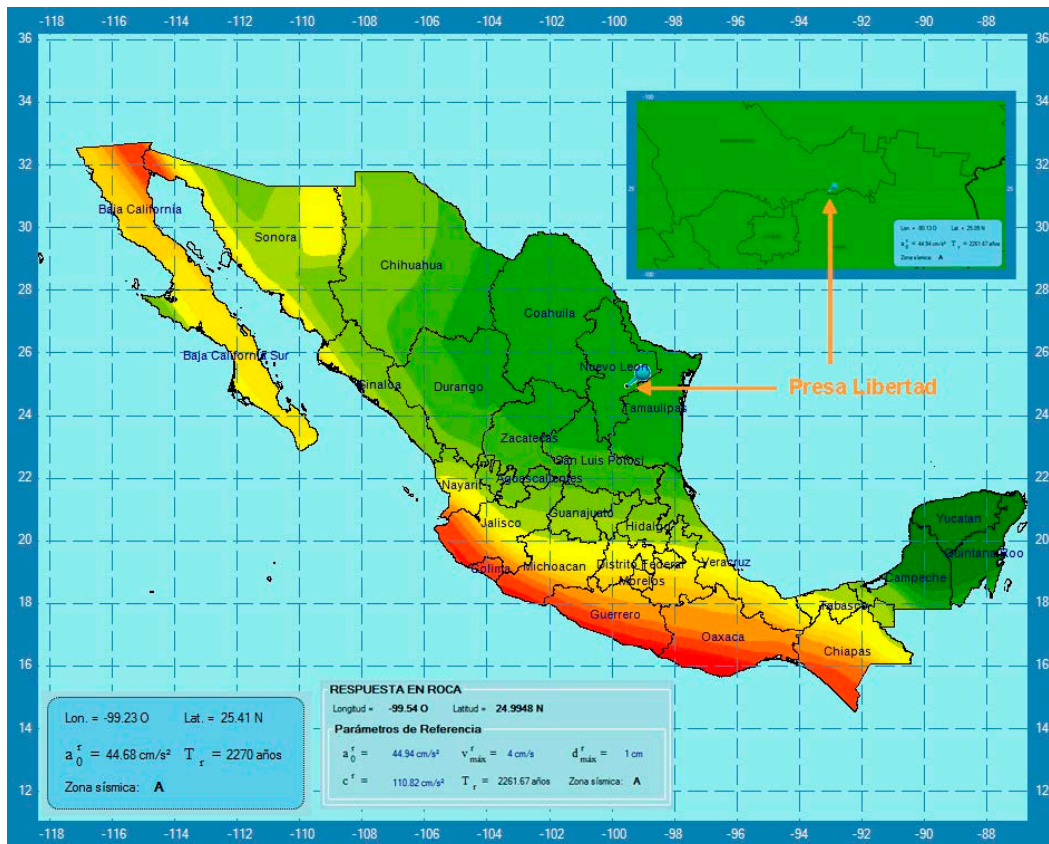


Figura 3. Sismicidad en el sitio de la presa.
 Modificado del programa PRODISIS v.4.1 del Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo, CFE, 2015

III.4 Fisiografía

Con base en E. Raisz (1964), la zona de estudio se ubica en la provincia fisiográfica de la Planicie Costera del Golfo, muy cerca de la provincia de la Sierra Madre Oriental. En una zonificación fisiográfica más reciente de Cervantes-Zamora (1990), el área se ubica en la provincia "Llanura Costera del Golfo Norte", dentro de la subprovincia fisiográfica número 36 denominada "Llanuras y Lomeríos". Esta provincia se interrumpe por algunas sierras aisladas, observándose alternancia de lomeríos con extensas llanuras, las cuales están formadas por materiales marinos cubiertos por delgados aluviones, los suelos predominantes son los vertisoles y regasoles, la vegetación predominante es el matorral submontano y matorral mediano espinoso, así como encinales y pequeños bosques de galería en las riberas de arroyos y ríos. Los patrones de drenaje de la zona son irregulares, las corrientes principales corren en dirección oeste a este, presentan un patrón semiparalelo, con su origen en la Sierra Madre Oriental.

IV. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se ubica dentro del elemento paleográfico denominado Cuenca Mesozoica, donde el basamento corresponde a una secuencia metamórfica de esquisto del Paleozoico (*Pcppi E*) denominada informalmente como basamento metamórfico Aramberri, constituido de filitas, filitas de cuarzo y metagrauvas, el cual es cubierto discordantemente por la Formación Huizachal (*TRsJ Ar-Lm*), constituida por una secuencia continental tipo molasse, con areniscas conglomeráticas, limolitas y en menor proporción lutitas de color rojo, asociadas al rifting inicial de la Sierra Madre Oriental (SMO); sobreyaciendo discordantemente se tienen de forma restringida delgados horizontes de areniscas cuarzosas y conglomerados de la Formación La Joya (*Jm Cgp-Ar*).

Al verse iniciada la transgresión marina empezó el depósito de las secuencias calcáreo-arcillosas que constituyen a la SMO, donde en algunas áreas se dio el desarrollo de plataformas someras en donde se constituyeron calizas de estratificación gruesa a masiva con capas de calizas margosas de la Formación Zuloaga (*Jok Cz*) y de una secuencia de anhidrita, yeso, caliza y lutitas de la Formación Olvido (*Jok Y-Do*); al darse la evolución sedimentaria sobrevino una distribución de distintas paleogeografías dando origen a múltiples facies, que de acuerdo con Eguiluz et. al., (2000), tuvieron influencia directa sobre el posterior desarrollo del plegamiento regional.

Sobreyaciendo se encuentra la Formación La Casita (*Jt Lu-Ar*) determinada por una secuencia de areniscas, lutitas, margas, calizas, carbón, yesos y algunos conglomerados. Para el Cretácico se inicia el depósito calcáreo-arcilloso de manera concordante y transicional de la Formación Taraises (*Kbeh Cz-Lu*) constituida por calizas arcillosas de estratificación delgada a mediana con intercalaciones de lutitas y limolitas, sobreyaciéndola concordantemente se tienen calizas de plataforma, talud y cuenca de la Formación Cupido (*Khap Cz*) compuesta por calizas de textura mudstone a wackestone, con estratificación media a gruesa; posteriormente se observa a la Formación La Peña (*Kap Cz-Lu*) constituida por una secuencia de calizas arcillosas y lutitas con escasos nódulos y lentes de pedernal, además de lutitas arenosas con fósiles hematizados como amonites. En contacto concordante y de manera transicional se tiene a la Formación Aurora (*Ka Cz*) compuesta por calizas de texturas que varían de mudstone a wackestone de estratificación mediana a masiva con ocasionales nódulos de pedernal color blanco y grisáceo además de intercalaciones con lutitas margosas en disposición laminar, sobreyaciendo concordantemente se tiene a la Formación Cuesta del Cura (*Kace Cz-Lu*) que se identifica como una caliza de textura que varía de packstone a wackestone y estratificación delgada a mediana con bandas delgadas de pedernal negro.

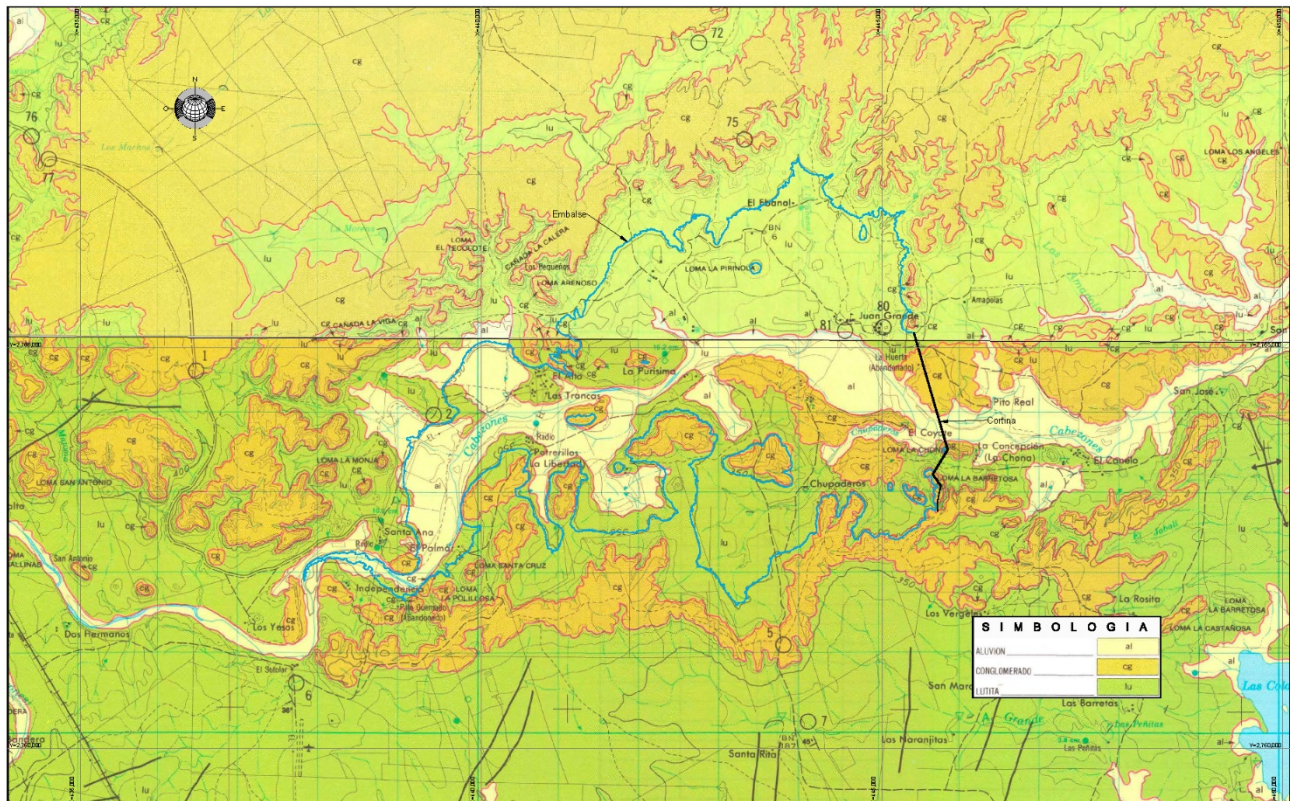


Figura 4. Geología Regional para el sitio de la presa.
 Modificado de la Carta San José de Las Flores, G14-C48, 1:50,000, CETENAL, México, 1976 y la
 Carta Linares, G14-C58, 1:50,000, DETENAL, México, 1978

Cubriendo transicionalmente se tiene a la Formación Agua Nueva (*Kcet Cz-Lu*) que consiste de una intercalación de caliza, lutita, limonita y caliza arcillosa con estratificación delgada con intercalaciones de nódulos y bandas de pedernal negro; sobreyaciendo se encuentra la Formación San Felipe (*Kcoss Lu-Cz*) donde se observa una caliza arcillosa y margas de textura wackestone-packstone presentando escasos nódulos de pedernal negro, además de intercalación de lutitas bentónicas que alternan con capas de arenisca y grauvaca, donde hacia su cima se muestra un predominio de lutita y arenisca que marca su contacto transicional con la Formación Méndez (*Kcm Lu-Mg*), la cual se encuentra expuesta ampliamente dentro de la zona de estudio, esta unidad consiste de una secuencia de lutitas calcáreas, físciles, deleznales y ligeramente caolínizadas, presentando esquistosidad de fractura, con intercalaciones de margas, limolitas, calizas, areniscas y delgadas capas de bentonita, su estratificación varia de laminar a mediana.

Para el Terciario se presentó el desarrollo de una gruesa secuencia de depósitos de ambiente mixto, representados por areniscas, limolitas y lutitas en el marco de una franca regresión marina, con algunas transgresiones. La evolución sedimentaria presentó el depósito de sedimentos continentales que cubren a las secuencias antes descritas de manera discordante, donde en la zona de estudio se observan a estos depósitos ampliamente distribuidos representados por la Formación Reynosa (*Tpl Cgp*) representada por conglomerados polimícticos compuestos por fragmentos de calizas, areniscas, pedernal y rocas ígneas extrusivas.

V. GEOLOGÍA LOCAL

El estudio geológico del área de la cortina se realizó sobre el eje del proyecto con una franja paralela al mismo hacia aguas abajo que fluctuó entre los 100 y 250 m de distancia que incluyó al antiguo Eje II (1980), y hacia aguas arriba en una franja con una distancia de cobertura que varió entre los 40 y 150 m.

El reconocimiento geológico realizado en superficie consistió en detectar y cartografiar las diferentes unidades litológicas expuestas en los afloramientos existentes, así como en levantar los datos estructurales más significativos del macizo rocoso. La zona del proyecto donde se ubica el eje de la cortina tiene una cobertura amplia de materiales recientes y abundante vegetación, además abundan depósitos de talud de extensión y espesor variable; también se tiene la presencia de materiales sedimentarios recientes, materiales conglomeráticos y un macizo rocoso sedimentario calcáreo arcilloso que conformaría el basamento de la zona de estudio. A partir de la información obtenida se elaboró una planta geológica mostrando los materiales existentes donde se indica la litología observada.

Localmente los materiales Terciarios coronan a todas las secuencias en las partes altas, apreciándose también antiguos rellenos de valles en el área de estudio; estos materiales se conforman por sedimentos continentales representados por un conglomerado polimíctico constituido por gravas, arenas y arcillas, con fragmentos de calizas y areniscas principalmente embebidos en una matriz limo arenosa con cementante de carbonato de calcio; los clastos se observan de subangulares a bien redondeados con tamaños que varían de milímetros a varios centímetros presentando mala clasificación. Esta litología es asociada al Conglomerado Reynosa (*Tpl Cgp*), cuyo espesor es muy variable llegando a alcanzar hasta 18 m en el área reconocida.

Aflorando en gran parte de la zona de estudio, y conformando el basamento rocoso donde se desplantará la cortina se tiene a una secuencia de calizas limosas y margas, físisles, de coloración verde amarillento, en zonas muy intemperizadas mostrándose muy alteradas y fracturadas, disgregándose en forma de punta de lápiz; presentando estructura masiva y estratificación laminar, con abundantes fracturas concoidales. Esta litología es asociada a la Formación Méndez (*Kcm Lu-Mg*).

Superficialmente y coronando discordantemente a todas las secuencias de rocas existentes se aprecian depósitos cuaternarios fluviales y coluviales, de poco a nada compactos, de espesores variables.

Tanto en el valle como en los taludes de los cerros se tienen depósitos de talud (*Qmt*) representados por clastos de lutita y conglomerado, de diferente granulometría, teniendo fragmentos desde unos cuantos milímetros hasta de 1 m de diámetro (bloques de conglomerado), mostrándose angulosos a subangulosos, embebidos en una matriz compuesta de arenas y arcilla, observándose en algunas zonas con abundante vegetación.

Cubriendo las partes bajas de la zona donde se ubicaría la cortina de la presa y el área cercana al río, se tienen depósitos aluviales (*Qal*) producto de la desintegración de las rocas preexistentes, conformados por clastos de diferente granulometría y composición; en las partes planas se muestran con tamaños desde milímetros hasta fragmentos de 20 cm, subangulosos a subredondeados, embebidos en una matriz areno arcillosa; hacia las márgenes del río está compuesto por fragmentos de tamaños variables desde 5 hasta 25 cm, subredondeados a muy bien redondeados, embebidos en una matriz arenosa principalmente. Los fragmentos que conforman este material son predominantemente de roca caliza, y en menor proporción de lutitas y conglomerados.

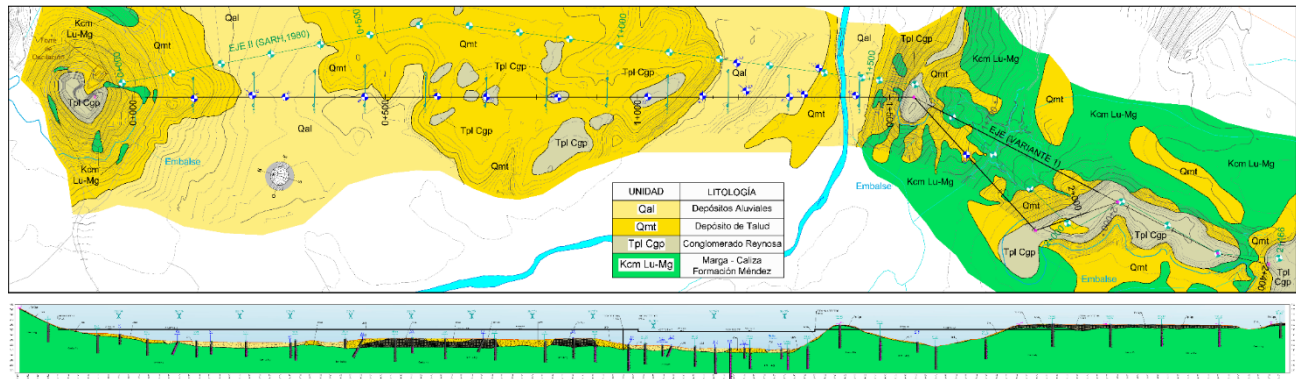


Figura 5. Esquema (sin escala) de la Geología Local (planta y perfil) por el eje de la cortina de la presa.

V.1 Geología estructural

La tectónica en donde se encuentra la zona de estudio refleja varios eventos, el más antiguo de edad pre-Jurásico superior, constituido por rocas metamórficas e ígneas, rocas marinas de edad Paleozoico y rocas continentales de edad Triásico superior que forman una gran estructura con un rumbo general NNW-SSE. Otro más joven, constituido esencialmente por una secuencia de rocas sedimentarias marinas de edad Jurásico superior-Terciario inferior, formando estructuras de dirección N-S con recostamiento hacia el E, y buzantes al N.

Las estructuras que enmarcan el área donde se ubica el proyecto de presa se definen como un cinturón de pliegues y cabalgaduras, conformado por anticlinorios y sinclinorios con una orientación NW-SE y N-S, afectas por fallas inversas paralelas a los ejes de pliegues, y posteriormente por fallamiento normal.

A partir de los afloramientos existentes se censaron 350 discontinuidades, de las cuales 20 fueron medidas en el conglomerado polimíctico y 330 en el basamento sedimentario clasificado como margas y calizas. El levantamiento geológico – estructural permitió definir el sistema de fracturamiento principal y en las figuras siguientes se muestran los diagramas estereográficos con la distribución espacial de las discontinuidades (fracturas) representadas con arcos y polos, generados mediante el programa Dips v.5.103 de Rocscience.

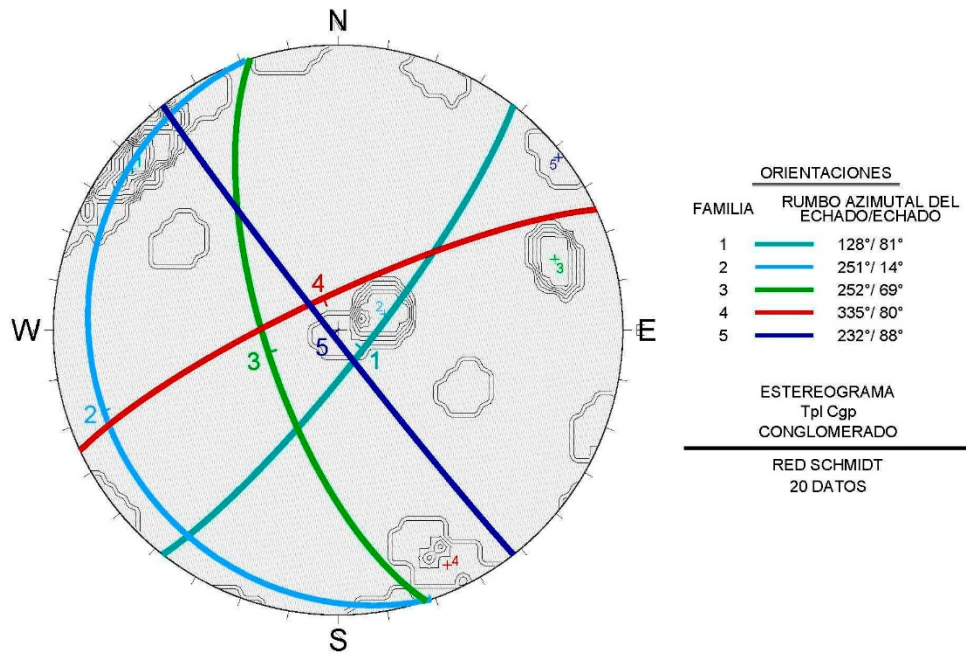


Figura 6. Diagrama estereográfico en red Schmidt en el Conglomerado (Tpl Cgp) representando espacialmente las principales familias de discontinuidades levantadas en la zona de la cortina de la presa.

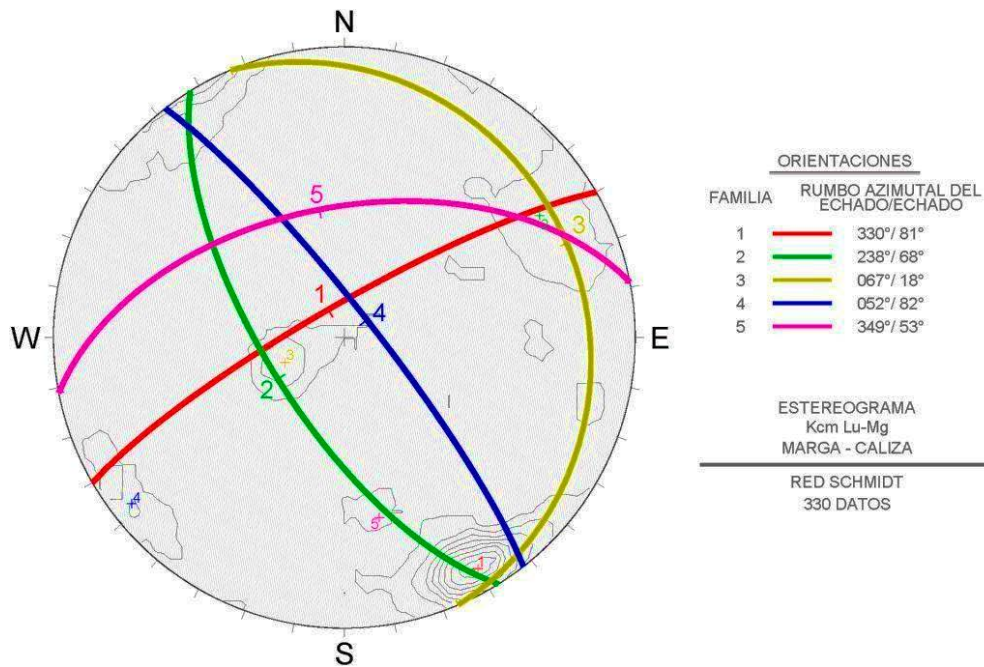


Figura 7. Diagrama estereográfico en red Schmidt en Margas y Calizas (Kcm Lu-Mg) representando espacialmente las principales familias de discontinuidades levantadas en la zona de la cortina de la presa.

En la siguiente tabla se reportan las familias o sistemas principales de discontinuidades (fracturas o fisuras) de las margas y calizas en la zona de la cortina haciéndose una descripción detallada de las mismas. Se realizó únicamente el análisis de las fracturas encontradas en el basamento sedimentario de margas y calizas debido a que éstas conforman prácticamente la totalidad de la litología observada sobre el eje, y debido a que los pocos conglomerados encontrados serán removidos durante el desplante de la cortina y otros más se ubican fuera del área de influencia.

No se encontró la presencia de alguna estructura que pudiese clasificarse como falla geológica en la boquilla del vaso de la presa.

Tabla 1. Familias o sistemas principales de discontinuidades en lutitas en la zona de la cortina.

Familia	Rumbo azimuthal de Echado / Echado	Características
1	330° / 81°	Fracturas de superficies onduladas y rugosas; cerradas, presentan rellenos de calcita y arcilla; muy continuas; espaciamiento de 0.01 a 0.40 m.
2	238° / 68°	Fracturas planas, onduladas y rugosas; cerradas en su mayoría, algunas rellenas con calcita y arcilla; muy continuas; espaciamiento de 5 a 20 cm.
3	067° / 18°	Fracturas onduladas y rugosas; cerradas y algunas con apertura de 5 mm; continuas; espaciamiento de 30 a 60 cm.
4	052° / 82°	Fracturas onduladas y rugosas; cerradas en su mayoría, algunas rellenas con calcita y arcilla; poco continuas a continuas; espaciamiento de 20 a 60 cm.
5*	349° / 53°	Fracturas onduladas y rugosas; cerradas en su mayoría, algunas presentan rellenos de calcita y arcilla; poco a muy continuas; espaciamiento de 0.1 a 30 cm.

* familia secundaria, en zonas estratificación aparente

Los estereogramas generados fueron comparados, primero entre los obtenidos entre el conglomerado y las margas-calizas, observándose similitudes; y segundo entre los levantados entre las distintas zonas de margen izquierda y margen derecha, donde se pudo identificar que no existe un cambio significativo entre ellos, por lo que los datos estructurales fueron asociados en uno solo para el basamento sedimentario arcillo – calcáreo.

Cabe destacarse que las margas y calizas se muestran en superficie muy alteradas y fracturadas, disgregándose en forma de punta de lápiz, además de abundantes fracturas concoidales, lo que influye en volverse muy deleznable. La estructura es masiva y se presenta una estratificación laminar, con bioturbaciones de color negro, las discontinuidades observadas exhiben constantes alabeos y en zonas rellenos de calcita, arcilla y presencia de óxidos de fierro.

VI. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

El Gobierno Federal a finales de los años 1970's y principios de los años 1980's efectuó una campaña de exploración sobre dos posibles alternativas de eje para la presa; se perforaron un total de 54 sondeos, de los cuales 28 se efectuaron en el Eje I y 26 barrenos se realizaron en el Eje II, para un total de 2,275.40 metros de barrenación, donde 1,287.50 m y 987.90 m fueron para los Ejes I y II respectivamente, ejecutándose además pruebas de permeabilidad de tipo Lefranc y Lugeon. Todos los sondeos se perforaron de forma vertical, alcanzando el más profundo los 54.50 metros de profundidad.

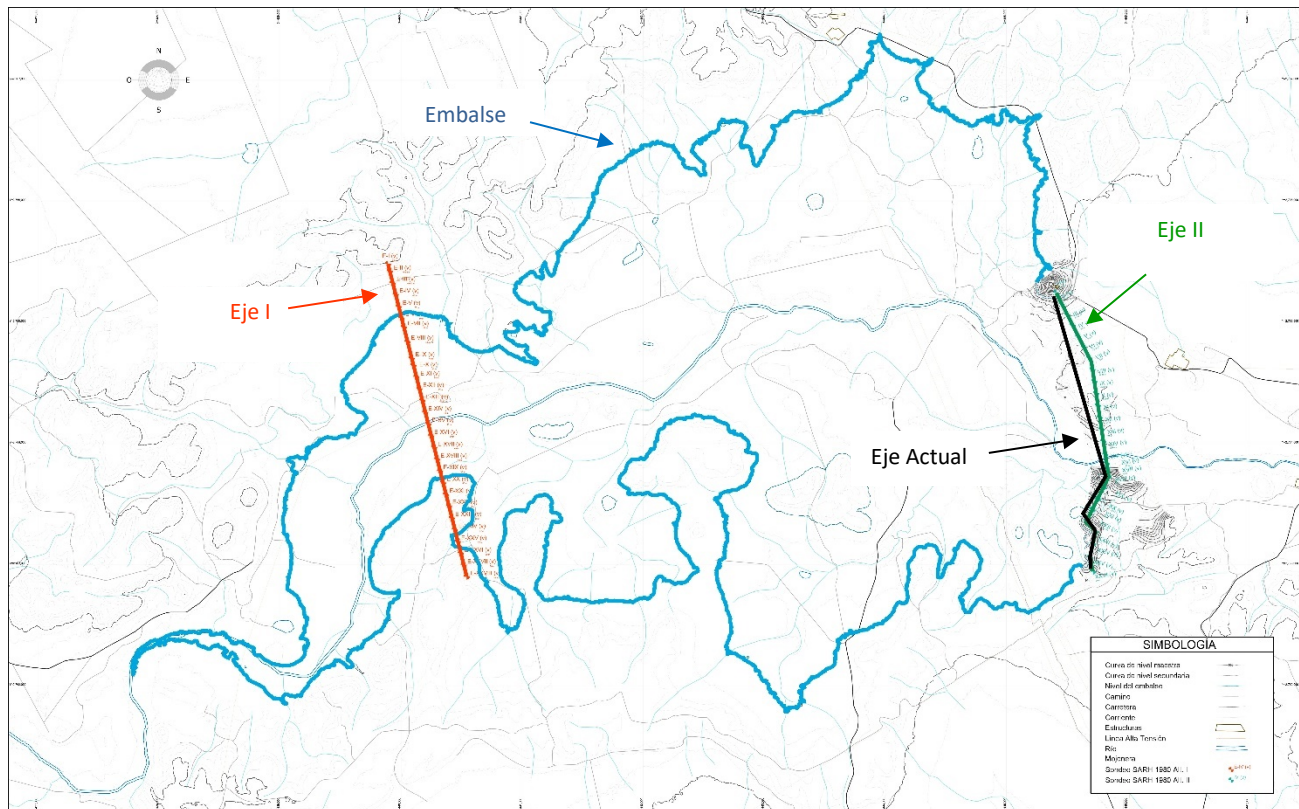


Figura 8. Esquema (sin escala) de la ubicación de los Ejes explorados para la presa (1980).

El Eje I se ubica a 5.2 km al poniente del eje actual de la cortina de la presa, observándose de forma asimétrica topográficamente, presentándose en su margen izquierda de pendiente moderada de pendiente fuerte hacia la margen derecha. Este alineamiento se observa sobre lutitas de color verde, muy alteradas y fracturadas, así como sobre conglomerados, los cuales coronan las partes altas de los cerros, mostrándose en la parte central un aluvión compuesto por arcillas, limos, arenas, gravas y boleos.

Las exploraciones fueron ejecutadas con máquina perforadora Longyear 34, operando con barril doble de diámetro NQ con pruebas de permeabilidad; encontrándose en la parte superior materiales aluviales y el macizo rocoso a no más de 7.70 m de profundidad.

En este mismo eje realizaron un total de 251 pruebas de permeabilidad ejecutándose tanto con el método Lefranc (35), en suelos y en la capa superior de la roca que se encontraba intemperizada, como con el método Lugeon (216), dentro del macizo rocoso. Los resultados de las pruebas de permeabilidad efectuadas reportan en general baja permeabilidad, observándose zonas en donde se registraron altas permeabilidades hasta la profundidad de 16 m, algunas de ellas y solamente en tres sondeos se reportaron alto consumo en los tramos de 15.00 a 22.00 m.

El Eje II se ubica muy cercana al eje actual de la cortina, definida por un eje quebrado, mostrándose de forma topográficamente asimétrica. En este alineamiento se observan conglomerados los cuales coronan las partes altas de los cerros, destacándose que ambos márgenes se muestran prácticamente sobre lutitas de color verde, muy alteradas y fracturadas, las cuales han sido labradas por el río, dando como resultado una cobertura superficial de aluvión y depósitos de talud compuestos por arcillas, limos, arenas, gravas y boleos. Las exploraciones también fueron ejecutadas con máquina perforadora Longyear 34, operando con barril "Wireline" de diámetro NQ con pruebas de permeabilidad; encontrándose en la parte superior materiales aluviales y el macizo rocoso a no más de 17.80 m de profundidad.

Se realizaron un total de 220 pruebas de permeabilidad ejecutándose tanto con el método Lefranc (75), en suelos y en la capa superior de la roca que se encontraba intemperizada, como con el método Lugeon (145), dentro del macizo rocoso. Los resultados de las pruebas de permeabilidad realizadas reportaron altas permeabilidades en algunos tramos en 8 sondeos y muy permeables tramos de 5 sondeos.

En este caso, al estar muy cerca el Eje II con el eje actual de la cortina, se incluyeron los resultados de la perforación en la revisión geológica proyectando su ubicación hacía el eje actual, considerando la elevación de acuerdo con el último levantamiento topográfico realizado en la zona de estudio.

VI.1 NUEVA CAMPAÑA DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Para identificar la distribución de los materiales presente sobre el eje de la cortina y conocer sus propiedades mecánicas, fue ejecutada en los meses de agosto a noviembre de 2018 la perforación de 16 barrenos en la zona del proyecto, con profundidades que van desde 20 hasta 90.60 m, 14 de ellos ubicados sobre el eje de cortina y 2 más ubicados aguas abajo del eje. De los sondeos perforados, 12 son verticales y 4 inclinados 30° respecto a la vertical, de éstos, 3 con rumbo N25°E y 1 con rumbo N10°W, con el objetivo de cortar el sistema de discontinuidades principal que es subvertical. En el plano anexo se muestra la ubicación de los barrenos en la planta y perfil geológico.

Las exploraciones fueron ejecutadas con máquinas Mobile Drill B-48, Mobile Drill B-51, Mobile Drill B-61 (instaladas en vehículos pesados) y Longyear 38 (de patín), operando barril "Wireline" de diámetro NX, y en algunos sondeos aplicándose el método de penetración estándar (SPT) para los suelos granulares, utilizándose también avances en estos últimos materiales mediante auger (herramienta helicoidal) y broca tricónica.

Todas las muestras recuperadas en los sondeos perforados fueron protegidas con plástico adherente y colocadas en cajas para núcleos, posteriormente se resguardaron donde no fueran afectadas por cambios de clima para conservar sus propiedades. Los núcleos recuperados fueron limpiados, clasificados, y se les tomaron medidas de longitud y diámetro, para posteriormente ser pesadas para obtener su peso volumétrico al momento de ser extraídas del barril muestreador.

El resultado de la exploración indica que en la parte superior se encontraron materiales aluviales conformados por arcillas limosas, limos arenosos, gravas y boleos de caliza de diferente granulometría subangulosos a subredondeados embebidos en matriz areno arcillosa, y en zonas conglomerado muy alterado sin consolidación, observándose esta capa superficial con espesores mínimo de 1 m, máximo de 20 m y un promedio de 10.25 m. Se tiene una segunda capa conformada de caliza limosa, margas y de intercalaciones no rítmicas de marga y caliza limosa con caliza mudstone de espesores variables, presentando estructura masiva con presencia de bioturbaciones, con espesores de mínimo de 12.90 m, máximo de 27.12 m y un promedio de 17.56 m. Finalmente se tiene una tercer capa que se mantiene a profundidad conformada por caliza mudstone de estructura masiva con presencia de bioturbaciones de fracturada a poco fracturada presentando rellenos arcillosos y de calcita, con bandeamientos de arcilla y material calcáreo.

VI.1.1 Piezómetros

Adicionalmente se efectuó la instalación de piezómetros en 12 sondeos de diferentes profundidades, para medir los niveles freáticos y sus variaciones; para equiparlos se utilizó tubería de PVC ranurada y ciega, instalando en la parte inferior el tubo ranurado con tapón de fondo y la sección ciega en la parte superior, relleno con arena sílica uniforme el espacio anular entre la pared externa del tubo ranurado de PVC y la pared del barreno, utilizándose posteriormente pellets, lechada y relleno granular fino hasta el brocal del sondeo. Para evitar la migración de finos hacia el interior del tubo de PVC se forró la porción ranurada con malla geotextil. Para protección adicional del tubo piezométrico y evitar la entrada de escorrentía superficial, se instaló una base con mortero y se colocó un tapón de PVC en su parte superior. Una vez finalizada la instalación del entubado se procedió a inyectar agua a presión para la limpieza interior del tubo de PVC.

Durante los trabajos de campo se midieron periódicamente los niveles de agua en todos los piezómetros y para descartar que el agua encontrada dentro de los pozos de observación fuera atribuible a una acumulación durante el proceso de perforación, instalación y/o limpieza, se realizó su extracción dentro de la tubería de PVC mediante una cuchara muestreadora teniéndose como resultado la recuperación del tirante de agua, por lo que se pudo constatar que los niveles observados son atribuibles al nivel freático existente.

El análisis de los niveles estáticos mostró variaciones en sus diferentes lecturas, encontrándose la mayor diferencia en solo uno de los sondeos con alrededor de 5 metros. Se observa en todos los niveles estáticos medidos la relación directa con el nivel presente en el río, además, se debe tomar en cuenta que el cauce se encuentra a mayor elevación hacia margen izquierda, encontrándose a menor elevación conforme se acerca a margen derecha.

VI.2 ENSAYES DE PERMEABILIDAD

Se realizaron un total de 79 pruebas en todos los barrenos perforados que alcanzaron profundidades entre 19.72 y 90.60 m, realizándose 7 ensayos tipo Lefranc en suelos, materiales granulares y en roca muy alterada a profundidades no mayores a 10 m; con el método Lugeon fueron ejecutados 72 ensayos en roca a profundidades mayores a 2.20 m, permitieron verificar la permeabilidad de los suelos residuales, materiales granulares y del macizo rocoso masivo constituido por calizas y margas de poco a muy fracturadas.

VI.2.1 Ensayes Lefranc

Para la ejecución de los 7 ensayos tipo Lefranc no se utilizó ademe metálico, realizando la prueba en tramos de intervalos de 1.95 a 5 metros. En 3 de las pruebas realizadas se aplicó el método de carga constante, manteniendo la carga mediante el nivel de agua en la boca del brocal del barreno contando el consumo mediante contador de litros tipo reloj.

Las 4 pruebas restantes fueron ejecutadas aplicando el método de flujo variable de descenso, determinándose la velocidad de descenso del tirante de agua con una sonda eléctrica en lapsos de tiempo de 5 minutos de duración, midiéndose el caudal de agua consumido.

Antes de iniciar los ensayos de cada tramo se llenó de agua el barreno durante 40 minutos o más hasta alcanzar la saturación del medio, verificando que el gasto en tres lecturas consecutivas se mantuviera sin variación.

La permeabilidad expresada como coeficiente de permeabilidad K se calculó con la siguiente expresión:

$$K = C(Q/H)$$

Siendo:

$$C = 1/2\pi [\log (H+(H^2+D^2)^{1/2})/H]$$

Donde:

- K= Coeficiente de permeabilidad (en cm/s)
- C= Coeficiente de forma para una elipsoide, donde $L/D > 4$. Equivalente al cilindro que representa la perforación libre considerada como cámara filtrante (en m^{-1})
- Q= Gasto de agua (en l/s)
- D= Diámetro de la perforación (en metros)
- H= Carga de agua en la parte media del tramo de prueba (cámara filtrante)

VI.2.2 Ensayes Lugeon

El equipo de bombeo utilizado para la perforación y para la ejecución de las pruebas de permeabilidad fue con bomba Moyno 3L6 con estator helicoidal tanto en los equipos Mobile Drill como en el equipo Longyear 38. El equipo para la ejecución de las pruebas de permeabilidad incluye manguera flexible reforzada para alta presión de 3/4" de diámetro interior, manómetros con glicerina de 11 y 21 kg/cm² de capacidad, contador de litros tipo reloj, tanque amortiguador de presión, tubing plástico de 1/4" para inflado de obturador, obturadores neumáticos sencillos y dobles de un metro de longitud de obturación y tanque de nitrógeno a presión para inflado del equipo.

Se ejecutaron 78 ensayos de tipo Lugeon tanto descendentes como ascendentes; los ensayos descendentes (37 pruebas) se realizaron con obturadores sencillos, en progresiones de 5 metros cada una en promedio; al terminarse la perforación del tramo a probar y de acuerdo con las características individuales de cada sondeo fueron utilizados dos tipos de obturadores, en un primer caso se retiró por completo el barril muestreador y la sarta de perforación, introduciendo obturadores sencillos de 1" y 1 1/2" de diámetro; en el segundo caso cuando no fue posible retirar toda la herramienta se retiró el barril muestreador y se subió la tubería hasta dejar libre el tramo de prueba, utilizando en este caso obturador de 3 cm de diámetro, el cual se deslizó por dentro de la tubería y la broca hasta quedar en el macizo rocoso. Para los ensayos ascendentes (35 pruebas) al terminarse la perforación se retiró el barril y la sarta de perforación, utilizándose doble obturador de 1 1/2" de diámetro, unidos con tubería de acero perforada para el paso del agua, con tramos de prueba variables desde 3.00 a 5.60 m de longitud.

Antes de cada ensaye se probaron los equipos de permeabilidad para la detección de fugas y se inflaron los obturadores en tubería de ademe diámetro HQ para garantizar el óptimo inflado para una correcta obturación dentro del pozo. También previo a ejecutar cualquier prueba se midió mediante sonda eléctrica el nivel freático, en donde no se encontró dicho nivel estático se procedió a saturar el medio durante 30 minutos o más verificando que el gasto en tres lecturas consecutivas se mantuviera sin variación. Cuando el tramo de prueba estaba por debajo del nivel freático no fue necesario proceder a la saturación previa del macizo rocoso.

Previo a la ejecución de cada ensaye el tramo de prueba fue lavado intensamente con agua limpia; para la ejecución del ensaye Lugeon, se calculó previamente la sub presión proveniente del tirante de agua arriba de la cámara filtrante hasta el nivel freático, y con la bomba se aplicaron presiones manométricas para tener en conjunto (presión manométrica + presión hidrostática – pérdidas por fricción) presiones efectivas mayores y cercanas, primero en una serie ascendente de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 kg/cm² durante cinco

minutos cada una de ellas y posteriormente una gama descendente de 8, 6, 4 y 2 kg/cm², también de cinco minutos de duración.

Durante el desarrollo de la prueba el bombeo de agua se mantiene hasta observar que la lectura del manómetro se estabiliza en la presión deseada y por medio del cierre o apertura de la válvula de retorno y/o de paso se mantiene la misma presión, registrándose la lectura inicial y final que indique el contador de agua en cada periodo. El cálculo consiste en obtener las absorciones (en unidades l/min/metro), para cada uno de los valores de presión efectiva aplicados durante la prueba.

Para conocer el comportamiento de las vías permeables del macizo rocoso se elaboraron dos gráficas de gasto vs. presión, una de todos los periodos registrados que permite deducir si hay procesos de apertura y contracción elástica de las fracturas, así como taponamientos con rellenos o destaponamiento de las fracturas, e incluso si se produce fracturamiento hidráulico, y otra donde se observa la presión máxima y dos lecturas al 25 y 60% de ésta misma para interpretar el comportamiento del macizo rocoso.

La permeabilidad Lugeon (UL) se calculó como el gasto obtenido por minuto y por metro para una presión de 10 kg/cm²; esta presión máxima efectiva fue alcanzada en prácticamente todas las pruebas realizadas.

VI.2.3 Resultados obtenidos

La categoría de permeabilidad fue asignada considerando el criterio o clasificación utilizado por la CONAGUA que establece permeabilidades para los diferentes intervalos de valores de unidades Lugeon.

En los 79 tramos ensayados, en materiales constituidos principalmente por margas, calizas limosas y calizas mudstone, se obtuvieron siguientes porcentajes de tramos por grado de permeabilidad:

Tabla 2. Resultados de pruebas de permeabilidad

Categoría	Interpretación con NAF		Interpretación sin NAF	
	No. Tramos	%	No. Tramos	%
Impermeable	29	37	38	48
Poco Permeable	40	51	33	42
Permeable	8	10	6	8
Muy Permeable	2	3	2	3
Altamente Permeable	0	0	0	0
	79	100	79	100

Como se aprecia en la tabla anterior, predominan los tramos impermeables y poco permeables con valores de permeabilidad entre 0 y 11 unidades Lugeon, que representan del 87% al 90% de los tramos ensayados.

En todos los sondeos fueron ejecutados ensayos de permeabilidad, aunque en algunos barrenos no fue posible ejecutar las pruebas en toda la columna debido a la inestabilidad del pozo, principalmente en los materiales granulares, ya que difícilmente se mantenía abierto el sondeo; en solo un sondeo fueron ejecutadas únicamente dos pruebas ya que se quedó entrampado el equipo dentro del barreno.

Analizando las pruebas y cálculos adicionales (considerando ausencia de nivel freático en roca sana) ejecutados se delimitó una zonificación de los materiales del subsuelo en función de sus condiciones hidrogeológicas, generándose tres Unidades Hidrogeológicas denominadas UH-1, UH-2 y UH-3, cuyas características se describen a continuación:

Unidad Hidrogeológica UH-1

Para definir esta unidad se consideraron valores de permeabilidad que van de 10^{-3} a 10^{-5} cm/s que se obtuvieron de pruebas Lefranc, por lo cual se clasificó entre permeable a muy permeable.

El valor mínimo obtenido en esta unidad fue de 3.40×10^{-5} cm/s (poco permeable) en un tramo de 0.00 a 4.70 m, el valor máximo fue de 3.48×10^{-3} cm/s (moderadamente permeable) registrado en un tramo de 5.70 a 7.65 m. También se incluyen tramos no probados donde no fue posible ejecutar la prueba Lefranc

porque no se logró recuperar el espejo de agua, o no se pudo ejecutar ningún ensaye por la inestabilidad del pozo, y donde se tuvo pérdida total de agua durante la perforación (muy permeable). Esta unidad es la más superficial y presenta espesores variables que están entre 1.60 m y 18.00 m, se presenta desde la margen izquierda extendiéndose por el eje de la cortina hasta el cerro cercano a margen derecha.

Esta unidad hidrogeológica está asociada a los depósitos aluviales y de talud, terrazas y suelo residual (Qal – Qmt) y a la capa intemperizada de la unidad conglomerática TplCgp (Conglomerado Reynosa).

Unidad Hidrogeológica UH-2

Esta unidad considera valores de permeabilidad que van de 4 a 18 UL que se obtuvieron de pruebas Lugeon, por lo cual se clasificó de poco permeable a permeable.

El valor mínimo obtenido en esta unidad para la categoría de poco permeable fue de 4.44 UL registrado en un tramo de 14.70 a 20.30 m, y el valor máximo fue de 11.71 UL obtenido en un tramo de 9.00 a 12.00 m. Para la categoría de permeable el valor mínimo registrado fue 12.58 UL en un tramo de 10.00 a 15.00 m y el máximo fue de 18.08 UL en un tramo de 16.00 a 19.00 m. Esta unidad se encuentra por debajo de la UH-1, presenta espesores variables de entre 1.20 m y 19.50 m. Se presenta desde la margen izquierda extendiéndose por el eje de la cortina hasta el cerro cercano a margen derecha, y continua hasta la zona del dique, perdiéndose hacia la parte más baja.

Esta unidad hidrogeológica se asocia a la capa superior de la Formación Méndez (KcmLu-Mg), compuesta principalmente por una intercalación no rítmica de margas, calizas limosas y calizas mudstone, las cuales se encuentran de medianamente intemperizada a sana, y de poco fracturada a ocasionalmente muy fracturada.

Unidad Hidrogeológica UH-3

Para la caracterización de esta unidad se tomaron valores de hasta 3 UL, obtenidas en pruebas Lugeon, clasificándose como impermeable.

El valor mínimo obtenido en esta unidad fue de 0 UL y el valor máximo fue de 3.20 UL obtenido en un tramo de 19.70 a 25.30 m; dentro de esta misma unidad se encuentran tramos que resultaron con una categoría de poco permeable.

Esta unidad es la más profunda de un espesor indefinido, se presenta por debajo de la unidad UH-2 a una profundidad promedio de 20 m; se presenta desde la margen izquierda extendiéndose por el eje de la cortina hasta el cerro cercano de margen derecha, y continúa hasta la zona del dique, donde sube hasta emerger a la superficie.

Esta unidad hidrogeológica se asocia a la capa sana de la Formación Méndez (KcmLu-Mg), compuesta principalmente por calizas mudstone y wackestone, las cuales ocasionalmente se encuentran poco fracturadas.

VII. ESTUDIO PETROGRÁFICO

Se realizó la caracterización petrográfica de 9 muestras de roca mediante un análisis por microscopía óptica para identificar las fases minerales transparentes y su proporción estimada. Para este estudio se utilizó un equipo que consiste de un microscopio estereoscópico Zeiss para descripciones megascópicas, un microscopio óptico de polarización para luz transmitida y luz reflejada marca Carl Zeiss, modelo "Axiolab Pol" adaptado con un analizador de imágenes "KS-300" y un microscopio petrográfico marca Leica modelo DM LP.

Para realizar la identificación del material pétreo se utilizó la Técnica de Petrografía aplicando luz transmitida, la cual consiste en el análisis microscópico de una lámina delgada de cada muestra (en una sección de roca de 30 micras de espesor), para determinar los minerales translúcidos presentes, sus proporciones y las relaciones texturales que permitan clasificar al material pétreo analizado.

Para la preparación de la lámina delgada, las muestras de material pétreo con buena consistencia son cortadas y desbastadas hasta alcanzar espesores promedio de 30 micras; el corte en húmedo se realiza mediante un disco de diamante de rin continuo a un espesor aproximado de 1.0 cm, este proceso se lleva a cabo en una cortadora en húmedo MK de disco diamantado, posteriormente se desbasta en una de sus caras para adherirla a un vidrio petrográfico mediante adhesivo óptico de curado ultravioleta, que soporta

un rango de temperatura que varía de -100°C a 125°C y tiene un índice de refracción de 1.56, se realiza un nuevo desbastado grueso de la muestra mediante un disco desbastador con polvo de diamante para llegar a un espesor de 0.3 cm y se continua con un desbastado fino de la muestra para alcanzar el espesor de 30 micras, finalmente se coloca un cubreobjetos mediante adhesivo óptico de curado ultravioleta.

Una vez obtenida la preparación se realiza el análisis petrográfico con un microscopio AXIOLAB POL de la marca Karl Zeiss, el cual interactúa con el software analizador de imágenes AxioVision.

De las muestras analizadas petrográficamente el resultado de 6 muestras fue de una clasificación litológica de Caliza mudstone / wackestone (Caliza biomicroesparítica), 1 de Marga, 1 de Caliza limosa y 1 de Roca cuarzo-feldespática silicificada y carbonatada.

Adicionalmente se dejaron al exterior dos muestras de roca sana de diferente litología a la intemperie para poder visualizar el grado de alteración que pudiesen presentar al estar expuestas a las condiciones climatológicas del sitio. La primera muestra es clasificada como caliza mudstone, y la segunda muestra fue clasificada como marga.

Tras dos meses las muestras ya presentaban deterioro, el núcleo de caliza mudstone presentó ligero agrietamiento pseudo-horizontal, observándose prácticamente todo el núcleo en buenas condiciones; el segundo núcleo, de marga, presentó mayor alteración al tener múltiple fracturamiento, mostrándose el núcleo completamente fraccionado.

VIII. ENSAYES DE LABORATORIO EN MUESTRAS DE ROCA

Se realizaron 134 ensayos de resistencia en los núcleos de roca extraídos de todos los sondeos perforados a diferentes profundidades; 70 ensayos se realizaron sometiendo las muestras a compresión axial y 69 midiendo deformabilidad, 64 más se realizaron sometiendo las muestras a compresión concentrada en una línea a lo largo del costado de las muestras para obtener su resistencia a tensión de forma indirecta, en la denominada prueba brasileña. Los núcleos seleccionados de roca tienen dimensiones de 4.66 a 4.81 cm de diámetro (NQ).

Los núcleos fueron cortados en las cabezas extremas perpendicularmente al eje del núcleo para alcanzar una altura de muestra de 2.5 veces el diámetro de la misma para el ensaye de compresión simple, módulo de deformabilidad, corte directo y ensaye triaxial, y de 2 veces el diámetro del núcleo para el ensaye de tensión indirecta en la prueba brasileña. El corte perpendicular se realizó con una cortadora de disco sencillo diamantado en una de las caras y rotando 180° la muestra para efectuar el corte de la cara opuesta y lograr el mayor paralelismo posible de las caras extremas, comprobándose al montar la probeta en una base nivelada y midiendo con nivel de burbuja la inclinación máxima.

Una vez hecho el corte, se procedió a terminar las caras utilizando polvo de esmeril grueso y mediano para el desbaste y polvo fino para el pulido y terminado final de las caras de las muestras que se ensayarían a compresión simple, de tal forma de evitar fricción con las platinas de la prensa.

Al terminar la preparación de las muestras se midieron directamente el diámetro y altura de las mismas con Vernier Digital 6" Mitutoyo (Calibración #500-196-20), tomando seis lecturas de diámetro, dos en la cara superior, dos en la mitad del núcleo y dos en la cara inferior. Finalmente se pesaron las muestras en una balanza electrónica Radwag WLC 2/A2 de 0.01 g de precisión y 2 kg de capacidad máxima.

A partir de la medición directa de las dimensiones de la muestra cilíndrica regular y del peso obtenido de cada muestra se evaluó el peso volumétrico de cada muestra como el cociente del peso de la misma entre su volumen, posterior a la prueba las muestras fueron secadas en horno para laboratorio para muestras de secado a 110°C por 24 hrs para obtener el peso seco y su respectivo peso volumétrico en seco.

VIII.1 Ensayes de Compresión Simple

Para realizar el ensaye de compresión simple se siguieron las recomendaciones establecidas por los métodos sugeridos de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.

Se utilizó una prensa rígida equipada con gato hidráulico de 50 toneladas de capacidad, calibrada por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) (acreditación F-32 de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA)), que incluye una platina inferior de acero templado y cara terminada a espejo de 14.2 cm de diámetro y la platina superior de 6.3 cm de diámetro, ambas con la cara terminada a espejo con asiento esférico y rótula.

Se ensayaron a compresión simple un total de 70 muestras de todos los sondeos perforados con relaciones de esbeltez (relación altura/diámetro) variables entre 2.28 y 2.70, las cuales fueron centradas entre las platinas de carga, aplicando carga con velocidad variable de 27 a 87 kg/cm²/mín.

La evaluación del módulo de deformabilidad, ejecutada en 69 muestras, se efectuó colocando en el tercio medio de cada muestra un par de anillos metálicos fijos a la probeta y entre los anillos dos micrómetros Fowler de 0.01 mm de precisión y una pulgada de carrera, en puntos diametralmente opuestos de la cara de las probetas. Los micrómetros midieron la deformación en el sentido del eje axial de las probetas entre los anillos metálicos, en la zona más deformable y más representativa de la deformabilidad de los núcleos. La distancia entre anillos fue equivalente a un tercio de la altura de las muestras; en este caso para evitar daño a los micrómetros en caso de falla de la muestra antes de la resistencia prevista, estos fueron retirados cerca del valor del 50% de la resistencia esperada a compresión simple, por lo que se extrapolaron la curva y tangente con base en la tendencia misma de la curva.

Con los datos de los esfuerzos aplicados y las deformaciones unitarias promedio obtenidas se elaboraron las gráficas esfuerzo axial-deformación unitaria, calculando el módulo de deformabilidad a partir de la pendiente de la recta tangente a la curva esfuerzo-deformación, en el punto donde el esfuerzo aplicado es el 50% de la resistencia a compresión simple de la roca; o bien, a partir del valor promedio de la pendiente de la curva.

VIII.2 Ensayo de Tensión Indirecta en Prueba Brasileña

Este ensayo se realizó con apego a la especificación ASTM D3967 en 64 muestras cilíndricas de todos los barrenos perforados con relaciones de esbeltez entre 1.76 y 2.04. Se aplicó carga repartida a lo largo del costado de la muestra con una velocidad de 6.5 a 14.2 kg/cm²/mín.

VIII.3 Resultados Obtenidos de los Ensayes

Las rocas ensayadas fueron clasificadas macroscópicamente como conglomerado, marga, caliza limosa, caliza mudstone y caliza wackestone. Los valores promedio de resistencia a compresión simple, módulo de deformabilidad y resistencia a la tensión indirecta obtenidos en los ensayes se indican en la tabla siguiente.

Tabla 3. Promedios de Resistencias y Módulos de Deformabilidad

Sondeo	Litología	Resistencia a Compresión Simple (Mpa)				Módulo de Deformabilidad (Mpa)				Resistencia a la Tensión Indirecta (Mpa)			
		N	Máx.	Mín	Prom.	N	Máx.	Mín	Prom.	N	Máx.	Mín	Prom.
1	Cz Limosa / Marga	3	44	37	41	3	13883	8575	10753	1	3	3	3
	Cz Mudstone	2	49	35	42	2	11559	9639	10599	1	5	5	5
2	Marga	1	50	50	50	1	20632	20632	20632	1	8	8	8
	Cz Mudstone	5	62	40	47	5	22867	17816	19460	3	6	4	5
3	Marga	1	52	52	52	1	13517	13517	13517	-	-	-	-
	Cz Mudstone	4	72	39	53	4	43346	15400	26477	5	8	4	6
4	Cz Limosa / Marga	2	41	13	27	2	10192	1962	6077	1	2	2	2
	Cz Mudstone	5	79	45	57	5	27222	17920	23606	3	8	5	7
5	Cz Limosa	1	65	65	65	1	38279	38279	38279	1	6	6	6
	Cz Mudstone	2	61	42	52	2	40050	24112	32081	3	8	4	5
6	Marga	1	34	34	34	1	7513	7513	7513	1	3	3	3
	Cz Mudstone	6	59	36	44	6	28313	7350	18227	3	6	3	5
7	Cz Mudstone	2	69	36	52	2	40281	4096	22188	3	9	4	6
8	Conglomerado	1	48	48	48	-	-	-	-	-	-	-	-
	Cz Mudstone	-	-	-	-	-	-	-	-	3	5	5	5
9	Cz Limosa / Marga	2	48	33	40	2	18667	10617	14642	1	4	4	4
	Cz Mudstone	5	113	51	66	4	26727	17967	22227	7	11	6	7
10	Cz Mudstone	4	77	38	59	4	51649	18071	32461	5	8	4	7
11	Marga	1	35	35	35	1	6732	6732	6732	-	-	-	-
	Cz Mudstone	4	87	72	79	4	43311	22046	32756	4	8	5	7
12	Cz Mudstone	3	55	48	50	3	24838	17422	21214	2	4	3	3
13	Cz Mudstone	5	71	21	53	5	25860	17944	22104	8	9	5	7
	Cz Wackestone	3	127	53	90	3	38434	20723	29874	4	13	6	8
14	Cz Mudstone	3	57	23	39	3	26309	4641	18589	2	6	4	5
15	Cz Limosa / Marga	2	61	29	45	2	39111	11200	25156	-	-	-	-
	Cz Mudstone	1	34	34	34	1	16867	16867	16867	-	-	-	-
16	Cz Mudstone	1	90	90	90	1	35008	35008	35008	3	8	4	7

N= número de muestras Máx= valor máximo
Mín= valor mínimo Prom= valor promedio
Mpa= Megapascales

Según la clasificación de Deere y Miller (1966), la roca del basamento se clasificó como de resistencia baja a media y relación de modulo medio.

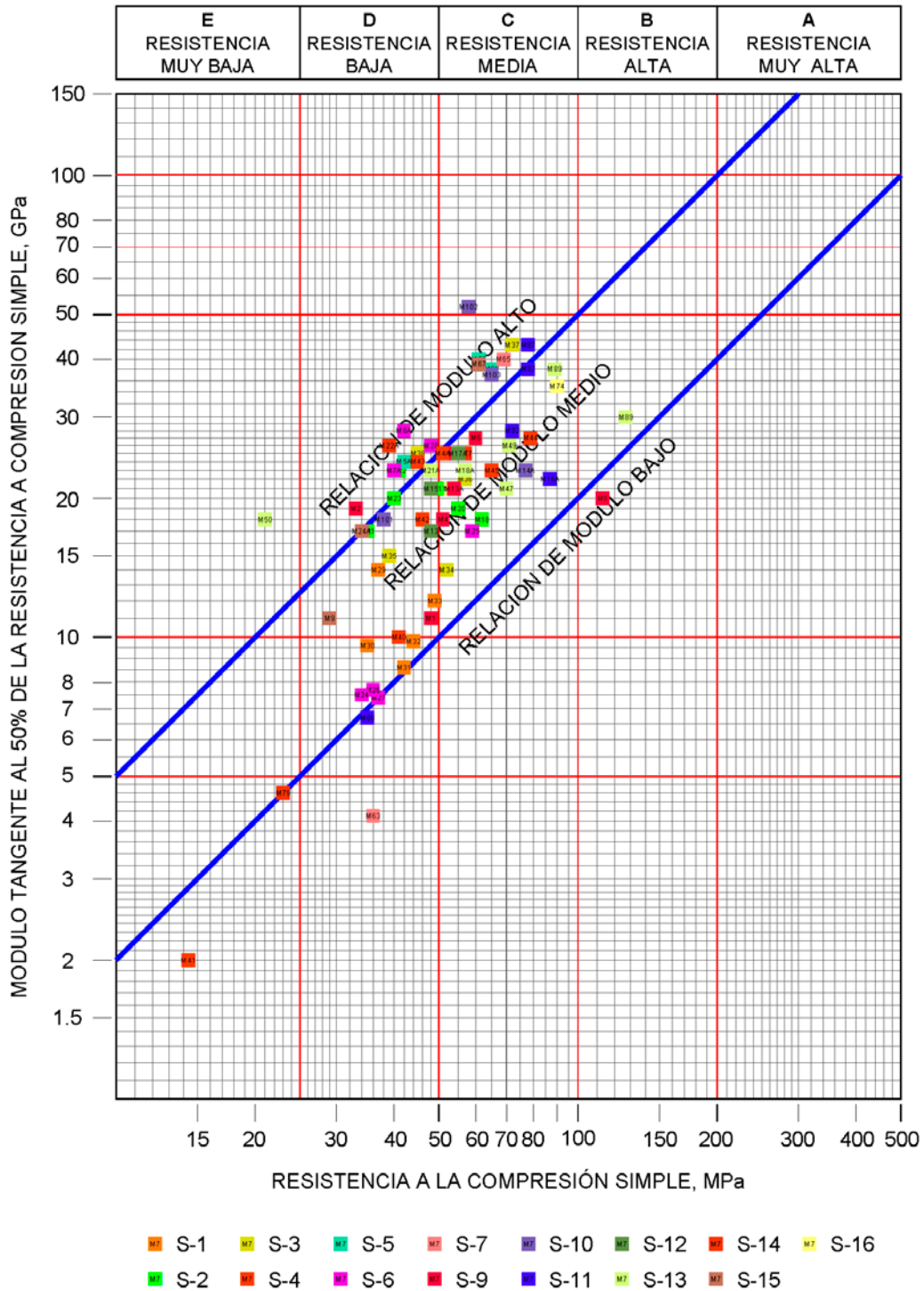


Figura 9. Clasificación Ingenieril de Roca Intacta según Deere y Miller (1966).

Los valores de resistencias del macizo rocoso presente en el proyecto de presa se muestran a continuación.

Tabla 4. Resistencias y módulos del macizo rocoso presente en el proyecto de presa

	R_c (MPa)	E_s (GPa)	R_t (MPa)
Valor Mínimo	13.38	1.96	2.13
Valor Medio	50.03	21.38	5.95
Valor Máximo	127.00	51.65	13.05

R_c = Resistencia a la compresión simple

E_s = Módulo secante de deformabilidad al 50% de la resistencia a compresión (*R_c*)

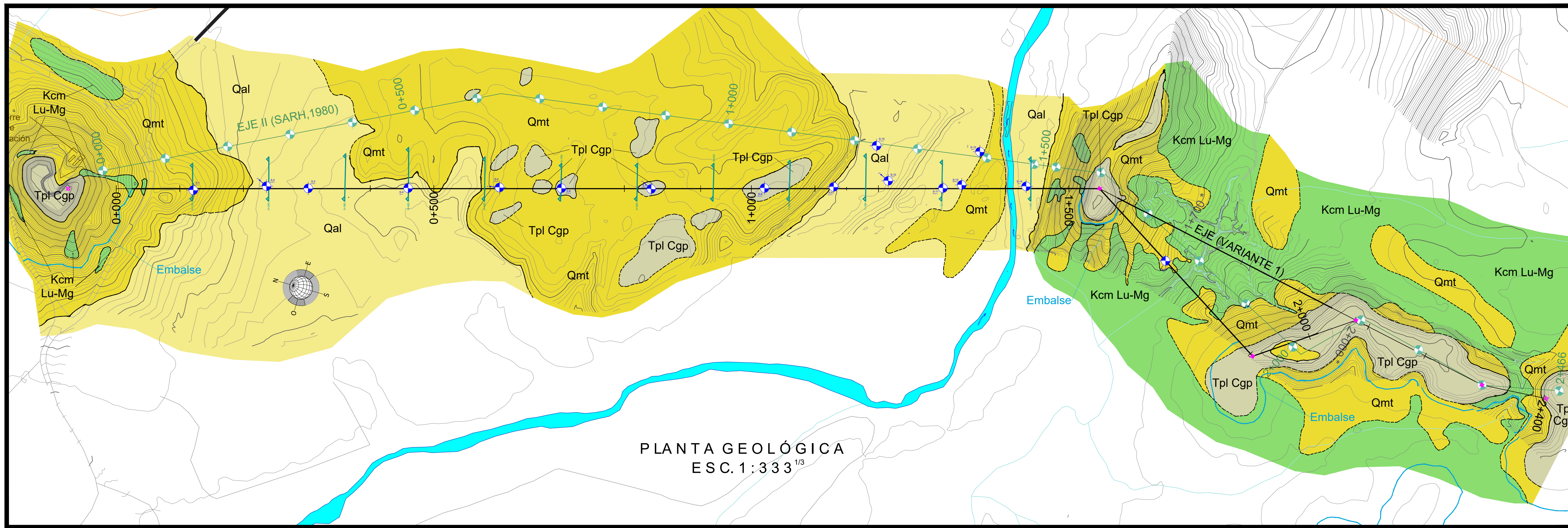
R_t = Resistencia a la tensión indirecta

LISTA DE REFERENCIAS

1. ASTM, 1987, **“Annual Book of ASTM Standards”**, Standard Test Method for Compressive Strength of Natural Building Stone. Pp. 16-19. Section 4. Construction. Vol 04.08. Soil and Rock; Building Stones; Geotextiles.
2. Ávila de Santiago, G., 1980, **“Informe Geológico Exploratorio y Pruebas de Permeabilidad de la Boquilla ‘La Libertad’, (Alternativas I y II), sobre el Río Potosí, Mpio. de Linares, Edo. de N.L.”**, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).
3. Cervantes-Zamora, Y., S. L. Cornejo-Olguín, R. Lucero-Márquez, J. M. Espinoza-Rodríguez, E. Miranda-Viquez, A. Pineda-Velázquez, 1990-1992, **“Provincias fisiográficas de México”**, Clasificación de Regiones Naturales de México 1, Tomo II, Sección IV, 10.1, Atlas Nacional de México, escala 1:4,000,000, Instituto de Geografía, UNAM, México.
4. Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL), 1976, **“Carta Geológica San José Las Flores G14C48, Nuevo León, Esc. 1:50,000”**, México.
5. Comisión Federal de Electricidad, IIE., 1993, **“Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo”**, CFE, México.
6. Comisión Federal de Electricidad, IIE., 2015, **“Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo”**, CFE, México.
7. Consejo de Recursos Minerales (CRM), 2004, **“Carta Geológico – Minera Linares G14-11, Estados de Nuevo León y Tamaulipas, Esc. 1:250,000”**, México.
8. Consejo de Recursos Minerales (CRM), 2003, **“Carta Geológico – Minera Río Bravo G14-8, Estados de Nuevo León y Tamaulipas, Esc. 1:250,000”**, México.
9. Dirección General de Estudios del Territorio Nacional (DETENAL), 1978, **“Carta Geológica Linares G14C58, Nuevo León y Tamaulipas, Esc. 1:50,000”**, México.
10. Eguiluz de Antuñano Samuel, Aranda García Mario, Marrett Randall, 2000. **“Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México”**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v LIII, p. 1-26.

11. Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., 2005, **“Geotechnical Engineering of Dams”**, Taylor & Francis. London. UK
12. García, E., 1998, **“Climas”**, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIO, escala 1:1,000,000, México.
13. González de Vallejo, L., *et. al.*, 2002, **“Ingeniería Geológica”**, Ed. Prentice Hall. Madrid.
14. Hoek, E., Carter, T.G. & Diederichs, M.S. (2013) Quantification of the Geological Strength Index Chart. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium held in San Francisco, CA, USA, June 23-26.
15. E. Hoek, C. Carranza-Torres & B. Corkum (2016) El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002. RocScience Inc. Web site:
<https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7713.pdf>
16. Hoek E. and E.T. Brown (1997) Practical estimates of rock mass strength. e International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, No 8, pp. 1165-1186.
17. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1981, **“Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods”**, Determining Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. Pp 113-116. Editor E.T. Brown. Pergamon Press.
18. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 1981, **“Rock Characterization Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods”**, Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics. Pp. 117-121.
19. López-Ramos, E., 1979, **“Geología de México, Tomo II”**, 2da. Edición, México, D.F., 454 p.
20. Muir, J.M., 1936, **“Geology of the Tampico Region, Mexico”**, American Association of Petroleum Geologists, Memoir. 280 p
21. Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L.M., Roldán-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Álvarez, S.A., y Nieto-Samaniego, Á.F., 1992, **“Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2’000,000”**, 5a. edición: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, mapa con texto explicativo de 74 p., México.
22. Palmer, R.H., 1927, **“Geology of Eastern Hidalgo and adjacent parts of Veracruz, México”**, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 11(12), 1173-1220

23. Penrose, RAF., 1890, "**A Preliminary Reporte on the Gulf Tertiary of Texas from Red River to the Rio Grande**", Texas Geol. Survey 1st Ann. RepL, p. 3-101
24. Pells, P.J., Z.T. Bieniawski, S.R. Hencher, and S.E. Pells (2017) Rock quality designation (RQD): time to rest in peace. Can. Geotech. J. Vol. 54 pp. 825–834.
25. Raisz Erwin, 1959, "**Landforms of Mexico**", Cambridge, Mass., U.S. Navy Geographical Branch, mapa, escala aprox. 1:3'000,000
26. Ramos-Arroyo Y.R., *et. Al.*, 2004, "**Características Geológicas y Mineralógicas e Historia de Extracción del Distrito de Monterrey, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros**", Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V.21, No. 2 p.268-284, México.
27. Ruíz-Vázquez, M., Pedrazzini C., 1996, "**Manual de Diseño de Obras Civiles**", Sección B (Geotecnia), Tema 1 (Geología), Capítulo 3 (Información Geológica Existente), Tomo 1 (Recomendaciones). Comisión Federal de Electricidad - Exyco, S.A., México.
28. Suter, M., 1990, "**Geología de la Hoja Tamazunchale, Estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, Carta Geológica de México, Serie de 1:100000**", UNAM Inst. de Geología, (22), 55 p.



PLANTA GEOLÓGICA
ESC. 1:333^{1/3}

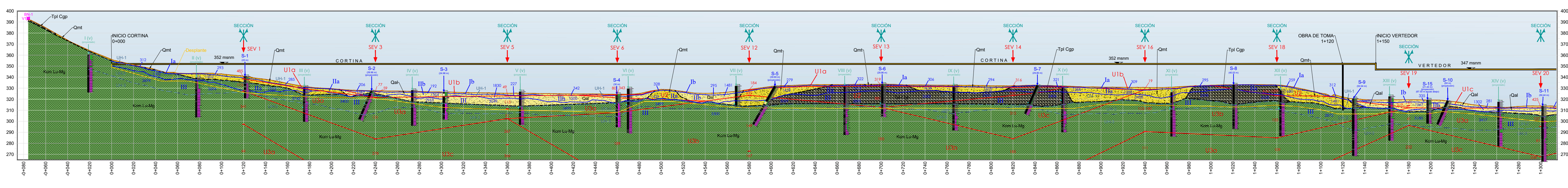


SIMBOLOGÍA

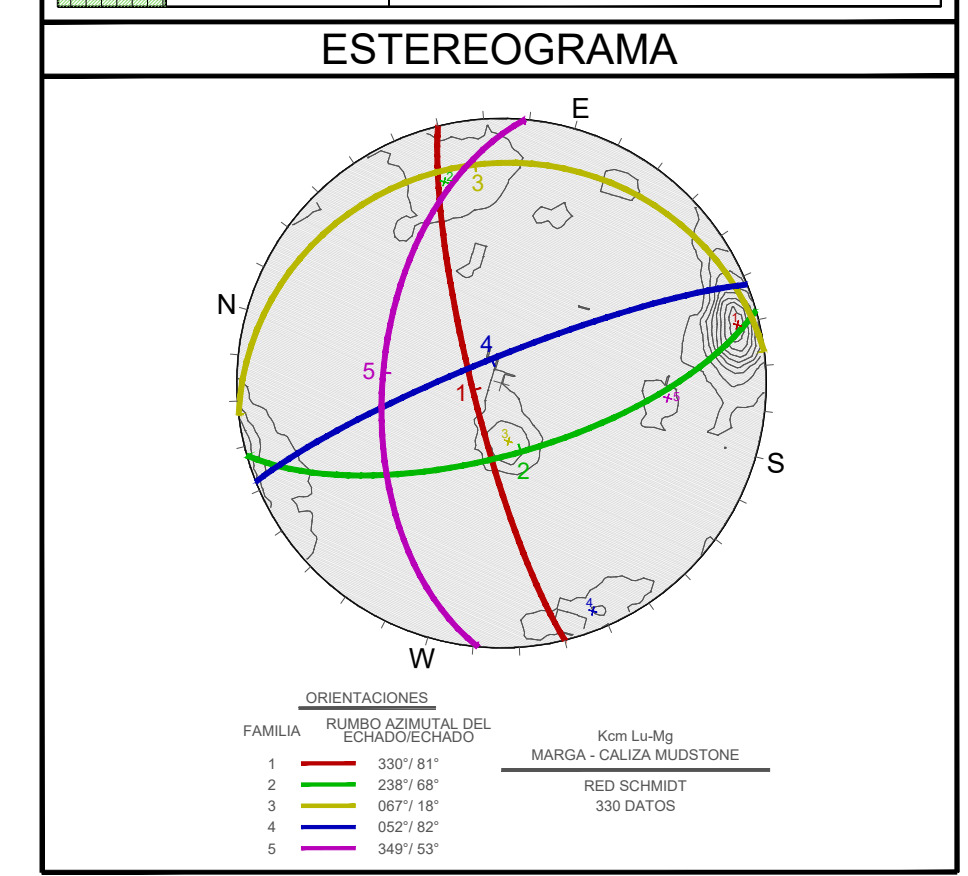
Curva de nivel maestra	Desplante	8
Curva de nivel secundaria	Geófono	1
Nivel del embalse	Punto tiro	1553
Camino	Velocidad onda	341
Carretera	Valor resistividad	1b
Corriente	Unidad sísmica	U3a
Estructuras	Unidad eléctrica	U3b
Línea Alta Tensión	Unidad hidrogeológica	UH-2
Río	Perfil geológico sondeo	
Mojonera		
Contacto geológico		
Sondeo SARH 1980 Alt. II		
Sondeo PSC 2018		
Sondeo inclinado PSC 2018		
Contacto geosísmico		
Contacto geoelectrónico		
Contacto hidrogeológico		

DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

UNIDAD	LITOLÓGICA	DESCRIPCIÓN
Qal	Depósitos Aluviales	Depósitos producto de la desintegración de las rocas preexistentes, distribuidos en la mayor parte de la zona de estudio, se conforman por clases de diferente granulometría, en las partes planas se muestran con tamaños desde milímetros hasta fragmentos de 20 cm, subangulosos a subredondeados, embebidos en una matriz arenosa arcillosa; hacia las márgenes del río se muestra compuesto por fragmentos de tamaños variables desde 5 hasta 25 cm, subredondeados a muy bien redondeados, embebidos en una matriz arenosa principalmente. Los fragmentos que conforman este material son principalmente de caliza, y en menor proporción de lutitas y conglomerados.
Qmt	Depósito de Talud	Unidad representada por clastos de lutita y conglomerado de diferente granulometría, teniendo fragmentos desde unos cuantos milímetros hasta de 1 m de diámetro (bloques de conglomerado), mostrándose angulosos a subangulosos, embebidos en una matriz compuesta de arenas y arcilla, observándose en algunas zonas con abundante vegetación.
Tpl Cgp	Conglomerado Reynosa	Sedimentos continentales constituidos por gravas, arenas y arcillas, con fragmentos de calizas y areniscas principalmente embebidos en una matriz limo arenosa con cemento de carbonato de calcio; los clastos se observan de subangulosos a bien redondeados, con tamaños que varían de milímetros a varios centímetros presentando mala clasificación.
Kcm Lu-Mg	Marga - Caliza Mudsstone Formación Méndez	Secuencia de margas, calizas limosas, calizas mudstone y wackestone, fisiles, de coloración verde y tonos amarillento y negro, en zonas muy impermeabilizadas, y fracturadas, disgregándose en forma de punta de lápiz; presenta estratificación laminar de estructura masiva, presentando abundantes fracturas concoidales.



PERFIL GEOLÓGICO LONGITUDINAL POR EJE DE CORTINA
ESC. 1:2,000



NOTAS:

- Acotaciones en metros
- Elevaciones en metros referidos al nivel medio del mar
- Topografía de la zona de la cortina elaborada en mayo 2018
- Información de la campaña de exploración de 1980 elaborada por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos tomada de: "Ávila de Santiago, G., Informe Geológico Exploratorio y de Pruebas de Permeabilidad de la Boquilla "La Libertad", (Alternativas I y II), sobre el río Potosí, Municipio de Linares, Estado de Nuevo León", San Luis Potosí, SARH, Diciembre 1980.

TABLA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

UNIDAD	PERMEABILIDAD	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
UH-1	Permeable a Muy Permeable	1.60 - 18.00	Depósitos aluviales, talud, terrazas, suelo residual y capa impermeabilizada de conglomerado
UH-2	Permeable a Poco Permeable	1.20 - 19.50	Intercalación no rítmica de margas, calizas limosas y calizas mudstone
UH-3	Impermeable	Indefinido	Calizas mudstone y Calizas wackestone

TABLA DE UNIDADES GEOSÍSMICAS

UNIDAD	VELOCIDAD (m/s)	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
Ia	259 - 375	0.10 - 2.70	Cobertura superficial de material de talud y/o conglomerado
Ib	192 - 354	0.30 - 2.80	Cobertura superficial de material aluvial suelto a muy suelto
IIfa	1285 - 1981	0.10 - 13.10	Material de talud, conglomerado y/o caliza poco compacta
IIfb	1234 - 1789	1.90 - 10.40	Material aluvial de muy poco compacto a medianamente compacto
III	2305 - 3742	INDEFINIDO	Caliza fracturada a poco fracturada y compacta

TABLA DE UNIDADES GEOELÉCTRICAS

UNIDAD	RESISTIVIDAD (ohm-m)	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
U1a	184 - 485	0.40 - 2.60	Cobertura superficial de material de talud y/o conglomerado
U1b	19 - 80	0.60 - 6.10	Cobertura superficial de material aluvial y talud con mayor cantidad de liros
U1c	161 - 521	1.40 - 7.40	Cobertura superficial de material aluvial con presencia de bolones
U2	230 - 1009	2.60 - 19.40	Material de talud y/o aluvial y/o conglomerado
U3a	< 131	1.30 - Indef.	Material aluvial y/o talud y/o caliza muy fracturada
U3b	149 - 180	31.00 - Indef.	Material de talud y/o caliza fracturada
U3c	178 - 415	30.00 - Indef.	Caliza de poco fracturada a sana

PROYECTO DE PRESA Estado de Nuevo León

ESTUDIO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO GEOLOGÍA DE LA CORTINA PLANTA Y PERFIL GENERAL

Elaboró: Gonzalo Condado Bernal

FECHA: ENERO 2019 ARCHIVO: GEOLOGIA Presa.dwg PLANO No.: 1 Revisión: 1