

IMPACTO DE LAS DISCONTINUIDADES LITOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES EN LA PRESA EL CUCHILLO SOLIDARIDAD, CHINA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

Ignacio Navarro-de León¹, Héctor de León-Gómez¹,
Jörg H. Werner-Paulus¹ y Cosme Pola-Simuta¹

RESUMEN

Con base en un estudio geológico-estructural, se determinó las discontinuidades litológicas y estructurales del macizo rocoso (loma Los Pozos) que funciona como dique natural en la presa El Cuchillo Solidaridad. La loma Los Pozos está constituida por una secuencia alternante de lutita y arenisca de edad terciaria, perteneciente a la provincia geológica Cuenca de Burgos. En esta secuencia afloran cinco paquetes de areniscas, y sobre ellas, discordantemente, afloran dos secuencias de depósitos fluviales pleistocénicos. La situación estructural de los estratos eocénicos es un homoclinal de dirección NNW-SSE, que buza ligeramente hacia el NEE, cuya dirección coincide con la del eje de la cortina. La existencia de zonas con un proceso de fractura intenso, de dirección SW-NE, convierte a la región en un mosaico de bloques. El sistema principal de fracturas es ortogonal (con direcciones paralela y perpendicular al rumbo de la estratificación y de la cortina), asociado a un sistema secundario de fracturas diagonales. El impacto de las discontinuidades litológico-estructurales se refleja en las filtraciones localizadas al pie y aguas abajo de la cortina y la loma Los Pozos. Estas filtraciones tendrán un efecto negativo en el gasto de suministro de agua para la ciudad de Monterrey, así como en la estabilidad del conjunto presa-cimiento.

Palabras clave: Presa, Cuenca de Burgos, abastecimiento de agua potable, fracturas, secuencia lutítico-arenosa.

ABSTRACT

Based on a geological structural study, is determined the importance presented by the lithological and structural discontinuities of the rocky massif used as natural dam (Loma Los Pozos), for El Cuchillo Solidaridad reservoir. The Loma Los Pozos is made up of an alternating sequence of Tertiary shale and sandstone within the geological province of Burgos Basin. Five packages of sandstone appear in this sequence, which are unconformably covered by two sequences of Pleistocene fluvial deposits. The structural position of the Eocene strata is that of a homoclinal with a NNW-SSE direction, going slightly towards the NEE and agreeing with the dam's axis. The existence of these zones with heavy fracturing running SW-NE makes the region a puzzle of blocks. The main fracture system is orthogonal (running parallel and perpendicularly to the dam's axis and stratification) associated with a secondary system of diagonal fractures. The impact of lithological-structural discontinuities reflects in seepages located at the bottom of the dam, downstream, and at Loma Los Pozos. These filtrations will have a negative effect on the water supply rate for Monterrey city, as well as in the stability of the dam and its foundation.

Key words: Reservoir, Burgos Basin, drinking water supply, fracturing, sandy-shale sequence.

INTRODUCCIÓN

Los estudios litológicos y estructurales, al igual que los hidrológicos y morfológicos, han sido fundamentales en la elección de sitios para la construcción de presas, ya que, a partir de sus resultados, se determina la factibilidad de la obra. Infortunadamente, en México estos estudios sólo son realizados como etapas iniciales de proyecto, cuando la experiencia en otros países ha demostrado que es necesario un seguimiento de las condiciones geológico-estructurales durante la construcción y puesta en operación de una presa, porque las condiciones geológicas originales son modificadas con la remoción de materiales para el acondicionamiento del sitio de construcción.

¹Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Carretera Linares-Cerro Prieto Km 8, 67700 Linares, Nuevo León, México.

La presa El Cuchillo Solidaridad se localiza en el estado de Nuevo León, aproximadamente a 102 km al oriente de la ciudad de Monterrey, estado de Nuevo León, en las cercanías de la población de China. Es una obra hidráulica construida durante los años 1990-1994 y forma parte de la etapa Monterrey IV del plan hidráulico de Nuevo León. Esta magna obra está destinada a la captación y almacenamiento de los escurrimientos de agua en la cuenca del río San Juan, para el abastecimiento de agua potable a los más de 3.5 millones de habitantes de la ciudad de Monterrey y su área metropolitana.

El área de estudio se localiza a 4 km al suroeste de la ciudad de China, en el estado de Nuevo León (Figura 1). Comprende la loma Los Pozos y representa un dique natural en la parte oriental de la presa El Cuchillo Solidaridad (Figura 2). Es de forma rectangular, con dimensiones de 3.5 x 3.0 km, extendida en dirección norte-sur. La región se encuentra comprendida en-

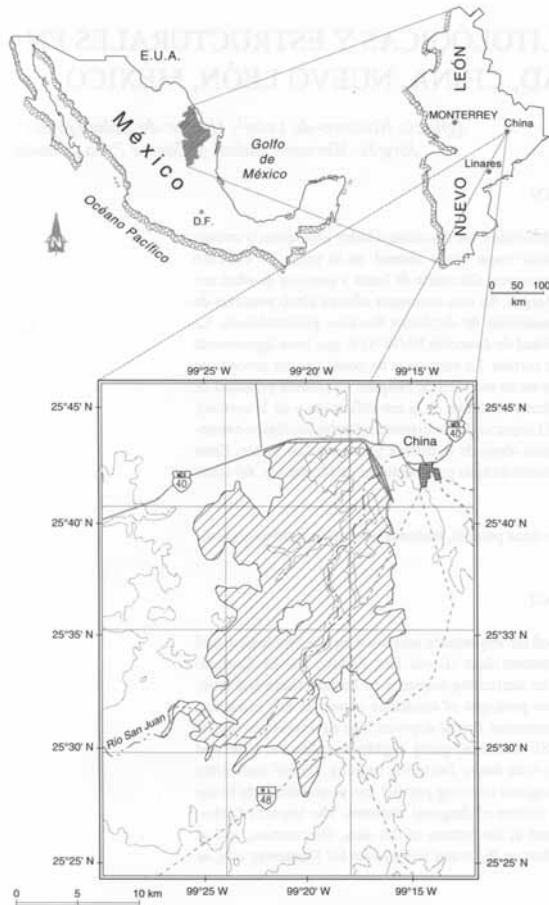


Figura 1. Localización de la presa El Cuchillo Solidaridad, China, Nuevo León, México.

entre las coordenadas $25^{\circ}40'11''$ - $25^{\circ}41'16''$ N y $99^{\circ}14'56''$ - $99^{\circ}16'08''$ W.

Los resultados de este estudio relacionados con el aprovechamiento integral de los recursos hidráulicos y comportamiento de la permeabilidad en macizos rocosos, contribuyen principalmente a sentar las bases metodológicas para el control y seguimiento de procesos subsiguientes en proyectos de construcción de futuras presas y, en segundo término, a elegir los sitios para la disposición de desechos domésticos y peligrosos en el noreste del país.

ESTUDIOS PREVIOS

Desde el punto de vista regional, en la Cuenca de Burgos se ha realizado estudios a partir de la década de los treinta, con fines de exploración petrolera. Sin embargo, los estudios locales y los que tienen como finalidad la construcción de obras hi-

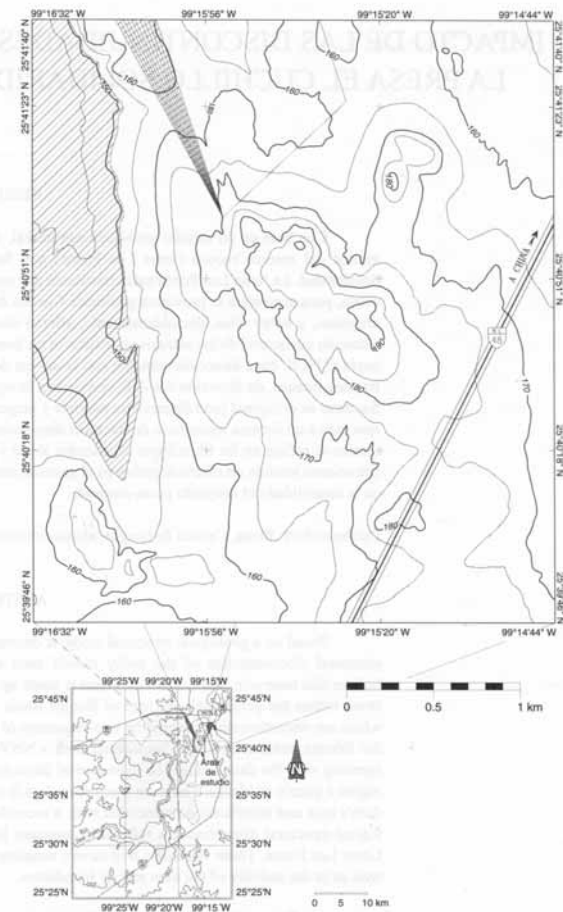


Figura 2. Localización del área de estudio, en la margen nororiental de la presa El Cuchillo Solidaridad, China, Nuevo León, México.

dráulicas, datan de la década de los setentas, cuando la Comisión Nacional del Plan Hidráulico (SARH, 1979) los hizo sobre la factibilidad del anteproyecto presa "El Cuchillo". En dichos estudios, se llevó a cabo observaciones geológicas, así como perforaciones verticales para pruebas físico-mecánicas. En el sitio del eje de la boquilla, se perforó un total de 13 barrenos, con una profundidad promedio de 25 m, para efectuar pruebas de permeabilidad de tipo Lefranc y Lugeon. Los datos obtenidos después de una profundidad de 10 m, variaron de poco permeable a impermeable, arrojando resultados favorables para la construcción de la obra anteproyectada, bajo condición de realizar un tratamiento de consolidación previo al sitio.

Con la aprobación e inicio de los trabajos de construcción de la obra, la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Universidad Estatal de Moscú establecieron un convenio de cooperación bajo los auspicios del Gobierno del Estado de Nuevo León. Dentro de este marco,

se contempló la integración de equipos mixtos de especialistas en diversas disciplinas de las geociencias, con el fin de llevar a cabo investigaciones geológicas y geofísicas en el área de construcción (UANL-UEM, 1993a, 1993b).

GEOMORFOLOGÍA

Por pertenecer fisiográficamente a la Gran Llanura de Norteamérica (INEGI, 1986), el relieve en la región está constituido por extensas planicies con pequeños accidentes topográficos causados principalmente por agentes erosivos.

El área de estudio, como rasgo geomorfológico principal, contiene una loma en la parte central, cuyas dimensiones son de 2 km de longitud por 1 km de anchura; está cubierta por conglomerados, remanentes de erosión y modelada por erosión selectiva (Figura 3). El relieve es suave con alturas absolutas que varían entre 145 m, en el lecho del arroyo La Rana, hasta 190 m, en la cima de la loma Los Pozos.

La profundidad de la disección del relieve es baja y los arroyos son intermitentes y angostos. Al suroeste de la loma Los Pozos, se presenta el valle del arroyo La Rana, mismo que será inundado conforme sea llenada la presa. Al sur de este valle, se encuentra un pequeño embalse y unos lomeríos que no sobrepasan los 12 m de su nivel base. A partir de las observaciones de campo, se puede concluir que el área es geomorfológicamente madura y que los agentes de modelación del relieve han sido principalmente de tipo físico-mecánico.

GEOLOGÍA (DISCONTINUIDADES LITOLÓGICAS)

Las discontinuidades litológicas formadas por las diferentes estructuras sedimentarias presentes en las formaciones del área de estudio, desde la composición de los estratos, la alternancia con diferentes tipos de rocas, los espesores, el grado de intemperismo, grado de karstificación, hasta las discordancias litológicas, son de vital importancia hidrogeológica.

El papel que representa el macizo rocoso de la loma Los Pozos, desde el punto de vista de la permeabilidad integral, puede ser evaluado partiendo de la observación directa de los ma-

teriales geológicos y su disposición. Para tal efecto, en el área de estudio se llevó a cabo la cartografía geológica a detalle con base en un mapa topográfico de escala 1:5,000, mediante recorridos de campo, observaciones directas de los afloramientos y toma de muestras.

A partir del mapa geológico del área loma Los Pozos (Figura 4), fueron trazados cuatro perfiles geológicos (Figuras 5 y 6), tres de ellos perpendiculares al rumbo general de los estratos aflorantes, y uno más en dirección longitudinal, procurando que cortasen el mayor número de pozos de monitoreo. En los perfiles perpendiculares se ha exagerado la inclinación de las capas para conservar las relaciones de las distancias horizontales con la profundidad.

Como resultado de la poca denudación y la falta de datos de perforación con recuperación de núcleo, no fue posible establecer una sección suficientemente detallada. Sin embargo, atendiendo la problemática planteada, la vertiente sudoccidental de la loma Los Pozos representa el mayor interés desde el punto de vista geológico-estructural, por lo que se elaboró una columna litológica compuesta (Figura 7) con una potencia de 116 m, partiendo del pozo de monitoreo 7 y siguiendo por la línea de perfil B-B' en dirección al arroyo La Rana hasta la línea de embalse.

El mapa geológico muestra los diferentes tipos de roca que afloran en el área y que a continuación son descritos con detalle en orden decreciente de edad.

SECUENCIA ARENOSO-LUTÍTICA (FORMACIÓN MOUNT SELMAN)

El nombre de Queen City fue dado por Kennedy (1892) a "una serie de areniscas rojizas y blancas laminadas en estratos medianos y lutitas arenosas" de edad eocénica, que afloran típicamente en las cercanías de Queen City, en el Condado de Cass en Texas. Wendlandt y Knebel (1929) fueron los primeros en cartografiar y describir esta secuencia en el oeste de Texas, designándola como un miembro de la Formación Mount Selman del Grupo Clairborne.

Esta secuencia aflora en la vertiente nororiental y sudoccidental de la loma Los Pozos, cuya parte inferior será inunda-

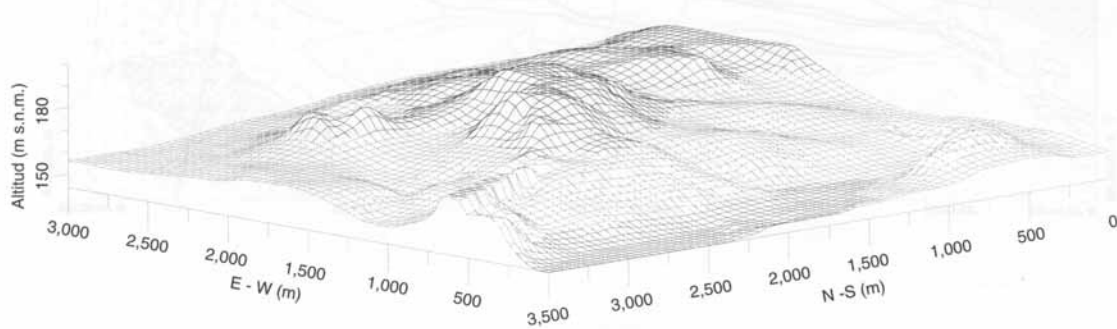


Figura 3. Relieve de la loma Los Pozos, vista hacia el sureste.

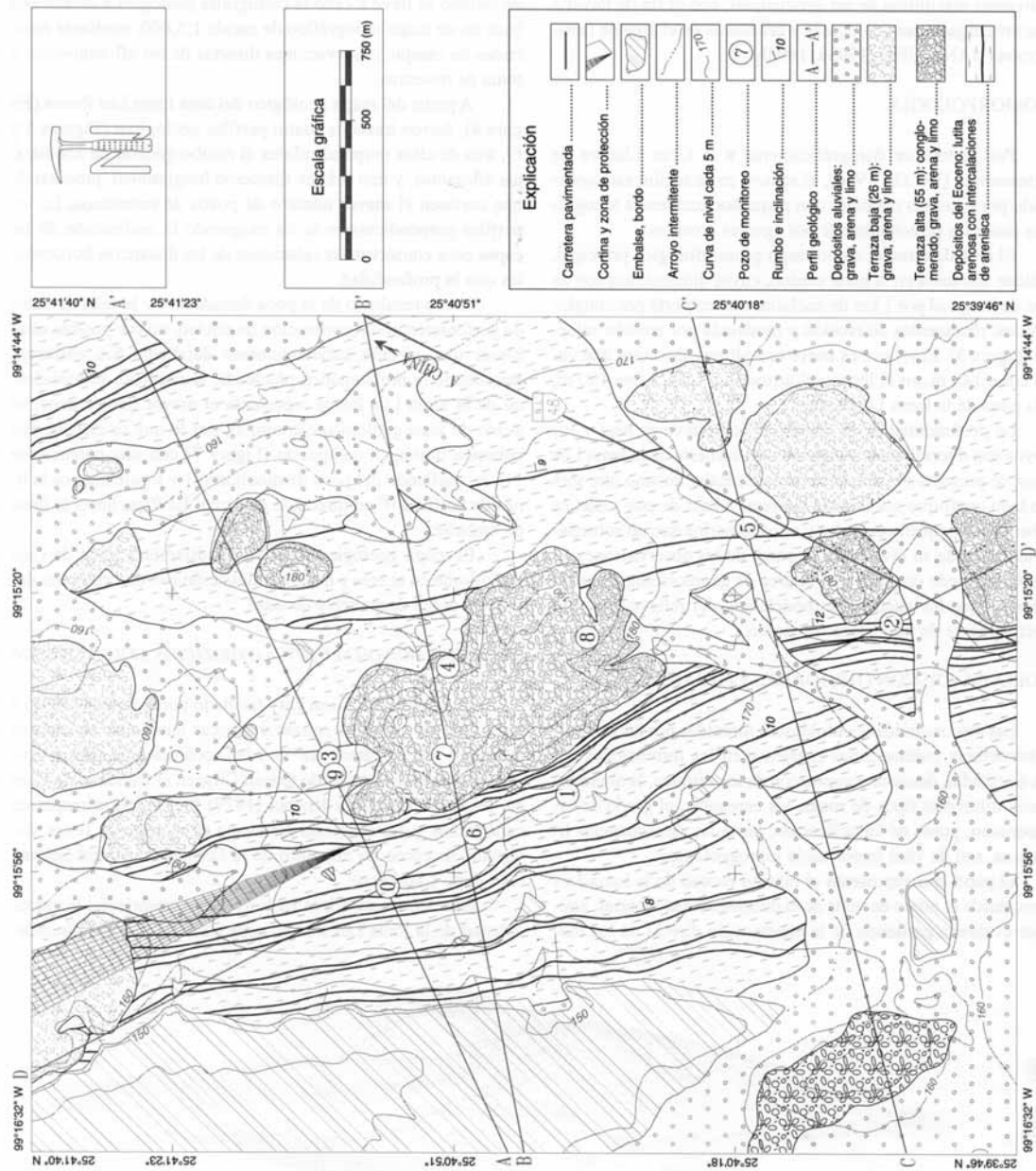


Figura 4. Mapa geológico del área Loma Los Pozos, China, Nuevo León, México.

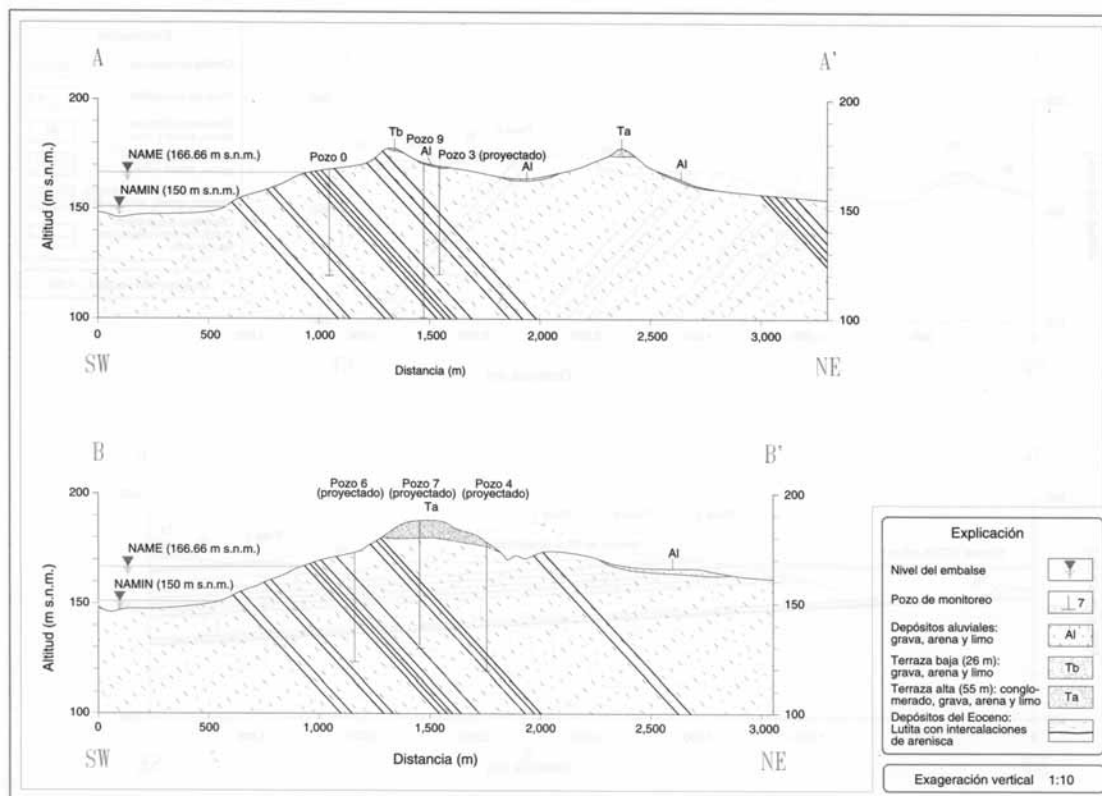


Figura 5. Perfiles geológicos A-A' y B-B', loma Los Pozos, China, Nuevo León, México.

da durante el llenado de la presa. Debido a que aflora muy poco, su estudio es extremadamente difícil y sólo fue posible hacerlo en canteras, arroyos y lugares donde el agua deslavó los sedimentos someros. Las lutitas arenosas se agrupan en capas laminares delgadas y llegan a constituir espesores de varios metros; son de color gris verdoso y al intemperizarse se tornan café amarillento. Las areniscas se presentan en bancos de espesor mediano (aproximadamente 20 cm), llegando a alcanzar espesores considerables (aproximadamente 2.5 m). Las areniscas, según la clasificación de Pettijohn (1949), son cuarcitas de grano fino a medio y en roca fresca muestran una coloración gris que se torna rojiza a medida que se intemperizan. En algunos sitios, las areniscas presentan estructuras sedimentarias como huellas de oleaje (*ripple marks*), marcas de arrastre (*groove casts*) y diastratificación; contienen, además, pequeños fragmentos de madera silicificada.

Con el propósito de conocer las características petrográficas de los estratos de arenisca, como son granulometría, componentes, distribución cristal-matriz, madurez textural y fábrica, se realizó el análisis petrográfico a partir de secciones delgadas de las rocas. Asimismo, mediante recorridos de campo se determinó que en la vertiente suroccidental de la loma, los ban-

cos de areniscas se agrupan principalmente en cuatro paquetes, constituyendo escalones en el relieve. El banco inferior de areniscas forma el escalón más pronunciado y se presenta en la parte oriental del arroyo La Rana, casi en la línea de embalse, tiene espesores que van de 4 a 4.5 m; intervalo en la columna litológica de 107–116 m.

Las areniscas (cuarcitas) de este grupo son de grano fino subredondeado (0.125–0.25 mm de diámetro), con una distribución mineral-matriz de 80–20%; los minerales principales son cuarzo y feldespato, como mineral accesorio limonita; la matriz está constituida por micrita.

El segundo grupo de areniscas aflora 110 m al oriente del anterior; se trata de estratos medianos (~40 cm) que conforman un paquete de aproximadamente 15 m de espesor en el intervalo 71–86 m de la columna litológica. Entre el primero y segundo grupos de areniscas, yace una capa de lutita arenosa con lentes de areniscas de espesores de menos de 15 cm. El segundo grupo de areniscas no forma escalones tan característicos como el primero.

En su parte basal, el segundo grupo de areniscas está formado por cuarcitas de grano fino, mientras que la parte superior por cuarcitas y subgrauvacas de grano medio subanguloso

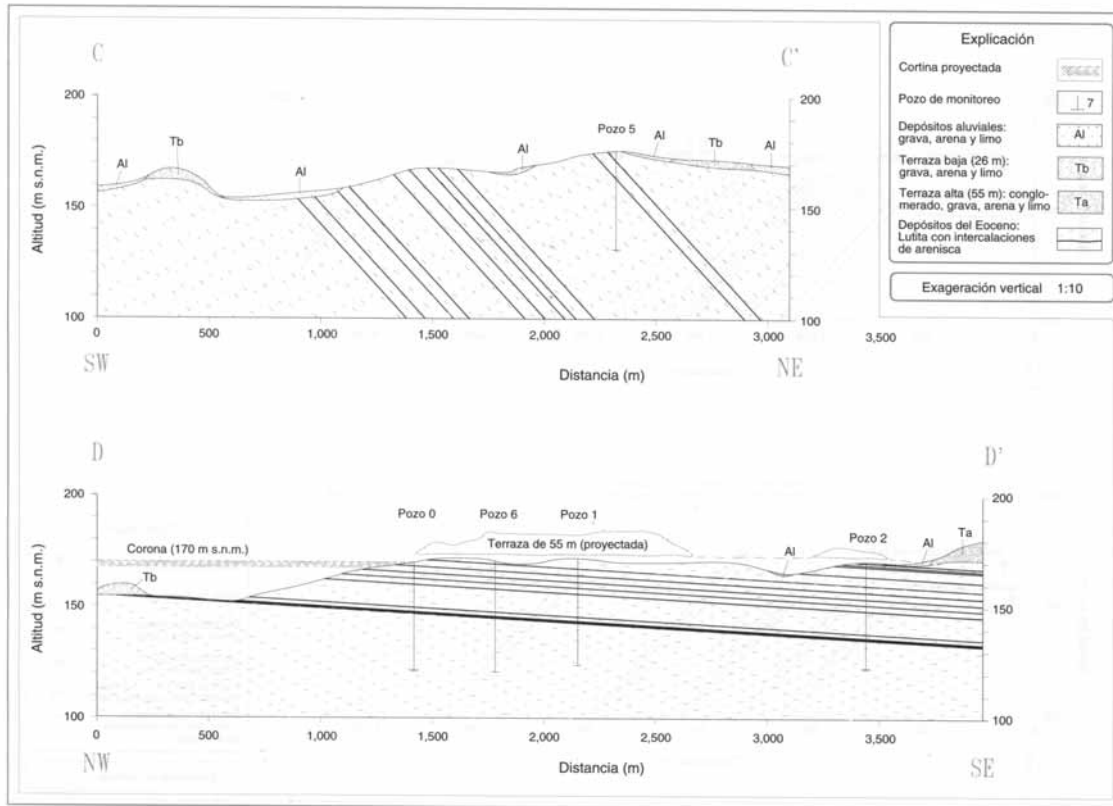


Figura 6. Perfiles geológicos C-C' y D-D', loma Los Pozos, China, Nuevo León, México.

(0.25–0.5 mm de diámetro). Las cuarcitas presentan una distribución de 85% de minerales (cuarzo, feldespato y cristales de calcita secundaria). Ambos tipos de roca presentan una matriz micrítica.

En la parte superior del corte, también afloran capas aisladas de areniscas laminadas que llegan a alcanzar los 50 cm de espesor. Estas capas están intercaladas con horizontes areno-arcillosos y registradas en el intervalo 47-60 m de la columna litológica.

Las del tercer grupo son cuarcitas de grano medio, subanguloso y con una distribución de 90–10% de cristal-matriz. Asimismo, se presenta un estrato característico con cuarcitas de grano medio, redondeado y éstos están cubiertos por una capa de cuarzo constituyendo un cemento de tipo “drusa”.

El cuarto banco de areniscas forma el último escalón frente a los conglomerados y está representado por dos capas de arenisca de diferente espesor—1.5 y 1.8 m, respectivamente (intervalo 17–18.5 m de la columna litológica). A diferencia de los paquetes areno-arcillosos antes descritos, en la parte superior de la sección (en el intervalo 23–26 m y 30–31 m de la columna) se observa margas y lutitas puras. Arriba de este banco de are-

niscas, continúa la secuencia areno-arcillosa hasta llegar a un contacto discordante con conglomerados que cubren la cima de la loma Los Pozos.

Estas rocas también son cuarcitas de grano medio subanguloso. Las características que presentan son completamente diferentes a las anteriores (granos en contactos largos y de punto), ya que los granos de cuarzo (80% de la roca) se presentan flotando en la matriz.

En conjunto, los bancos de arenisca representan aproximadamente el 25% del paquete de rocas que constituyen la sección. La variabilidad lateral en la composición litológica de los bancos de arenisca-arena-arcillosa es muy importante para la evaluación de la permeabilidad integral del macizo, por lo que en recorridos de campo se observó variaciones en sus espesores, así como la intercalación de lentes de arenisca en las secuencias areno-arcillosas.

Debemos recalcar la presencia, en toda la sección, de concreciones de limonita, de forma ovalada y alargada, cuyas dimensiones generalmente alcanzan los 4-6 cm. En algunos sitios, estas concreciones constituyen delgados horizontes de 3–5 cm de espesor.

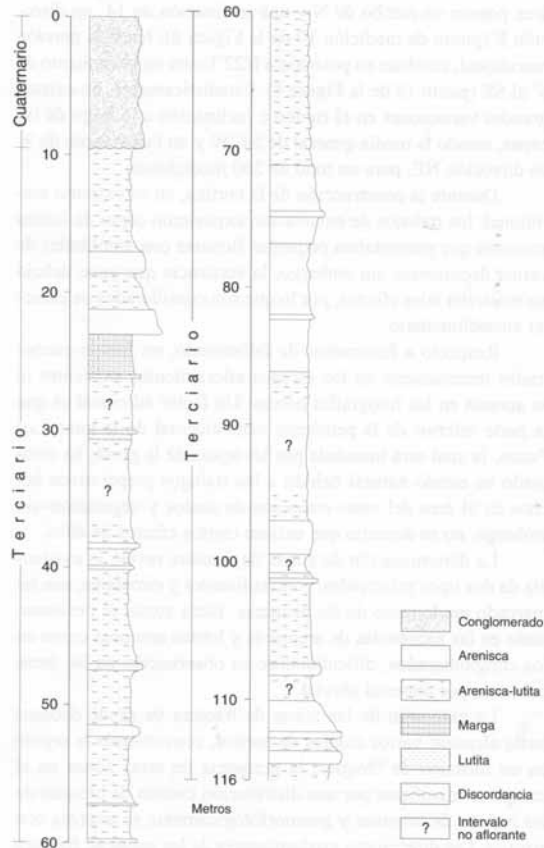


Figura 7. Columna litológica compuesta para la vertiente occidental de la Loma Los Pozos, China, Nuevo León, México.

TERRAZAS DE GRAVAS DEL PLEISTOCENO

La descripción original de una terraza de gravas de origen fluvial-continental fue dada por Penrose (1890) para describir un afloramiento de gravas cementadas por un depósito calcáreo blanco, conocido comúnmente como caliche, en la ciudad de Reynosa, Tamaulipas; y le asignó el nombre de "Formación Reynosa". En 1946, Mullerried paralelizó estos sedimentos con los cuerpos de gravas presentes en la Planicie Costera del Golfo Norte e incluyó también a las terrazas fluviales de los cañones de la Sierra Madre Oriental. Sin embargo, por falta de una definición y delimitación claras, así como de una edad conocida de la llamada "Formación Reynosa", se rechaza la paralelización de ésta con las terrazas de la Planicie Costera del Golfo Norte. El origen de las terrazas de gravas es consecuencia del levantamiento progresivo de la Sierra Madre Oriental y los diferentes cambios climáticos que han ocurrido durante el Cuaternario, mismos que a su vez traen consigo periodos de depósito y ero-

sión. La edad relativa de estas terrazas fue asignada tentativamente al Pleistoceno temprano, mientras que su edad absoluta todavía no ha sido aclarada, por lo que se realiza investigaciones paleoclimáticas y paleogeográficas en el noreste de México. Para su clasificación, se ha diferenciado a las terrazas considerando la altura respecto a un nivel erosivo de referencia (cauce de río), por lo que siguiendo este criterio morfoestratigráfico, en el área de estudio fueron diferenciados dos niveles de terraza (Figura 6, perfil D-D') respecto al lecho del río San Juan:

Terraza alta o terraza de 55 m. En contacto discordante erosivo con la secuencia de areniscas y lutitas arenosas. Esta terraza está formada por conglomerados, gravas, arenas y limos. Los conglomerados son polimicticos, cuyos componentes son básicamente gravas redondeadas de caliza, arenisca y pedernal de formaciones mesozoicas, cementados en diferente grado con material calcáreo (caliche). Las gravas sin cementar son subredondeadas a redondeadas, de caliza y arenisca, principalmente, y en algunos sitios muestran imbricación. En menor proporción se encuentra arenas de grano fino con diastratificación y limos de color amarillo claro. Esta terraza constituye la cima de la loma Los Pozos y la de los cerros que sobrepasan los 180 m s.n.m.m. Se desconoce el espesor total de la terraza alta, por lo que para el área de estudio se estima un promedio del orden de 8 a 10 m; sin embargo, durante la perforación del pozo 7, se determinó un espesor aproximado de 16 m, donde se sugiere el centro de un canal relleno. La posición de esta terraza, muy por arriba del nivel máximo calculado para la presa, no juega papel alguno desde el punto de vista de la filtración del macizo. En la porción meridional del área, esta terraza se ha utilizado como banco de material para la construcción del dique y la cortina.

Terraza baja o terraza de 26 m. Esta terraza descansa discordantemente sobre la secuencia arenoso-lutítica eocénica y está constituida por gravas, arenas y limos. Las gravas son subredondeadas y mal clasificadas, en su mayoría de composición calcárea y rara vez cementadas para formar conglomerados. Estas gravas están en contacto con arenas cuarcíticas de grano medio, formando interdigitaciones. Los limos son de color amarillo claro y alcanzan a constituirse en delgados paquetes de 20–30 cm de espesor.

Al igual que con la terraza alta, se desconoce el espesor total de la terraza baja, pero su espesor máximo en el área es de alrededor de 8 m en la porción suroccidental. Se distribuye al sur y norte del área formando lomeríos suaves.

Atendiendo a las relaciones geomorfológicas, se concluye que la terraza baja es más joven que la alta, y ambas se manifiestan como reliquias aisladas, testigos de una intensa erosión (Figura 4).

DEPOSITOS FLUVIALES RECIENTES

Los depósitos fluviales holocénicos están representados por aluviones constituidos por bloques, gravas, arenas y limos.

Los bloques son de arenisca de color gris a café rojizo, angulosos y presentan poco transporte. En conjunto, estos materiales constituyen espesores pequeños e insignificantes, siendo apenas de unos cuantos metros en el arroyo La Rana, donde están mejor representados. En las pendientes, sus espesores son significativamente menores y yacen en forma de estrechos lentes alargados hacia los arroyos. Cabe destacar que en ciertas áreas, los espesores eran pequeños y dificultaron el estudio de las rocas que yacen debajo.

GEOLOGIA ESTRUCTURAL (DISCONTINUIDADES ESTRUCTURALES)

Las discontinuidades estructurales están compuestas por todos aquellos elementos estructurales presentes en el macizo rocoso de las formaciones que afloran en el área de estudio. Ellas son los sistemas de fractura, planos de fallas, planos de esquistosidad, ejes de estructuras sinclinales y anticlinales. En combinación con las discontinuidades litológicas, determinan los mecanismos de filtración del macizo rocoso.

Partiendo del análisis de las fotografías aéreas, escala 1:38,000, fueron delimitadas las zonas de cizallamiento o fractura. Para la determinación de estas zonas, se tomó en cuenta todos los rasgos característicos, tales como formas lineales en el plano, alargamiento de formas, relaciones estructurales, variación de la vegetación, rasgos geomorfológicos y variación de los tonos de color. Estas zonas presentan lineamientos con azimutes de 340-0° y 70-98°, formando un sistema ortogonal. Los lineamientos con rumbo SW-NE son los más frecuentes en la vertiente sudoccidental de la loma Los Pozos y en ocasiones se manifiestan geomorfológicamente como arroyos. La extensión de estas zonas de fractura va desde varias decenas de metros hasta casi un kilómetro. En el campo, se reconoce a estas zonas por una distribución caótica de los bloques de arenisca, principalmente.

El estudio de la geología estructural se realizó mediante la integración de la información revelada por las fotografías aéreas, así como por la observación directa a través de recorridos de campo y la medición de los elementos estructurales en las rocas aflorantes. Partiendo de la información anterior, se procedió a la elaboración del mapa geológico-estructural mostrado en la Figura 8.

Como resultado de la geodinámica regional (levantamiento de la Sierra Madre Oriental, hundimiento de la Cuenca de Burgos y desplazamiento de los depocentros hacia el oriente), la situación estructural de la secuencia de rocas eocénicas en la región de la loma Los Pozos se presenta como un homoclinal ligeramente inclinado hacia el este (Galloway *et al.*, 1991).

Los afloramientos de las areniscas generalmente están marcados, en las fotografías aéreas, por una vegetación más densa; en los afloramientos areno-arcillosos, la cubierta vegetal es escasa y de poca altura.

Los estratos muestran pequeñas variaciones en su disposición espacial, mientras que en la porción septentrional del

área poseen un rumbo de N y una inclinación de 14° en dirección E (punto de medición 10 de la Figura 8); hacia la porción meridional, cambian su posición a N22°E con un buzamiento de 6° al SE (punto 13 de la Figura 8). Estadísticamente, no existen grandes variaciones en el rumbo e inclinación a lo largo de las capas, siendo la media general de N6°W y un buzamiento de 9° en dirección NE, para un total de 360 mediciones.

Durante la construcción de la cortina, en su extremo meridional, los trabajos de excavación expusieron capas de lutitas arenosas que presentaban pequeñas flexuras con amplitudes de varios decímetros; sin embargo, la secuencia que yace debajo no mostraba tales efectos, por lo que son considerados de carácter sinsedimentario.

Respecto a fenómenos de fallamiento, no fueron encontrados directamente en los escasos afloramientos existentes ni se aprecia en las fotografías aéreas. Un factor adicional es que la parte inferior de la pendiente suroccidental de la loma Los Pozos, la cual será inundada por las aguas de la presa, ha cambiado su estado natural debido a los trabajos preparativos hechos en el área del vaso—remoción de suelos y vegetación—sin embargo, no se descarta que existan ciertos efectos de ellos.

La determinación de zonas de fractura reveló la existencia de dos tipos principales: formas lineales y circulares, con un marcado predominio de las primeras. Estas zonas se presentan tanto en las secuencias de areniscas y lutitas arenosas como en los conglomerados, dificultándose su observación en las áreas cubiertas por material aluvial.

La extensión de las zonas de fractura va desde decenas hasta alcanzar varios cientos de metros, convirtiendo la región en un mosaico de bloques; la presencia de estas zonas en el campo se manifiesta por una distribución caótica de bloques de los bancos de arenisca y geomorfológicamente se expresa con arroyos. Las direcciones predominantes de las zonas de fractura son N50°E y N70°W, siendo más frecuentes las primeras. El origen de este sistema de fractura se atribuye a los últimos efectos de la Orogenia Laramide (Echánove, 1986).

Las observaciones de campo mostraron que el proceso de fractura superficial está desarrollado en las areniscas, lutitas arenosas y lutitas, manifestándose en mejor forma en las areniscas. La diferencia en las fracturas de las areniscas y las arenas arcillosas está muy bien marcada por el carácter de la vegetación.

La medición de las fracturas se realizó en 13 sitios y su proyección estereográfica se muestra en el mapa geológico-estructural, apreciándose un sistema ortogonal principal (con direcciones paralela y perpendicular al rumbo de la estratificación y de la cortina) y un sistema diagonal secundario (Figura 9).

Las fracturas perpendiculares a la estratificación tienen un rumbo N85°E y una inclinación de 81° al NW, mientras que las fracturas paralelas poseen N9°W de rumbo y 79° de inclinación al SW. Prácticamente, todas las fracturas son subverticales y su abertura va desde escasos milímetros hasta 4–5 cm.

Las fracturas están rellenas generalmente por óxidos de hierro, calcita y, ocasionalmente, por yeso. La densidad de las

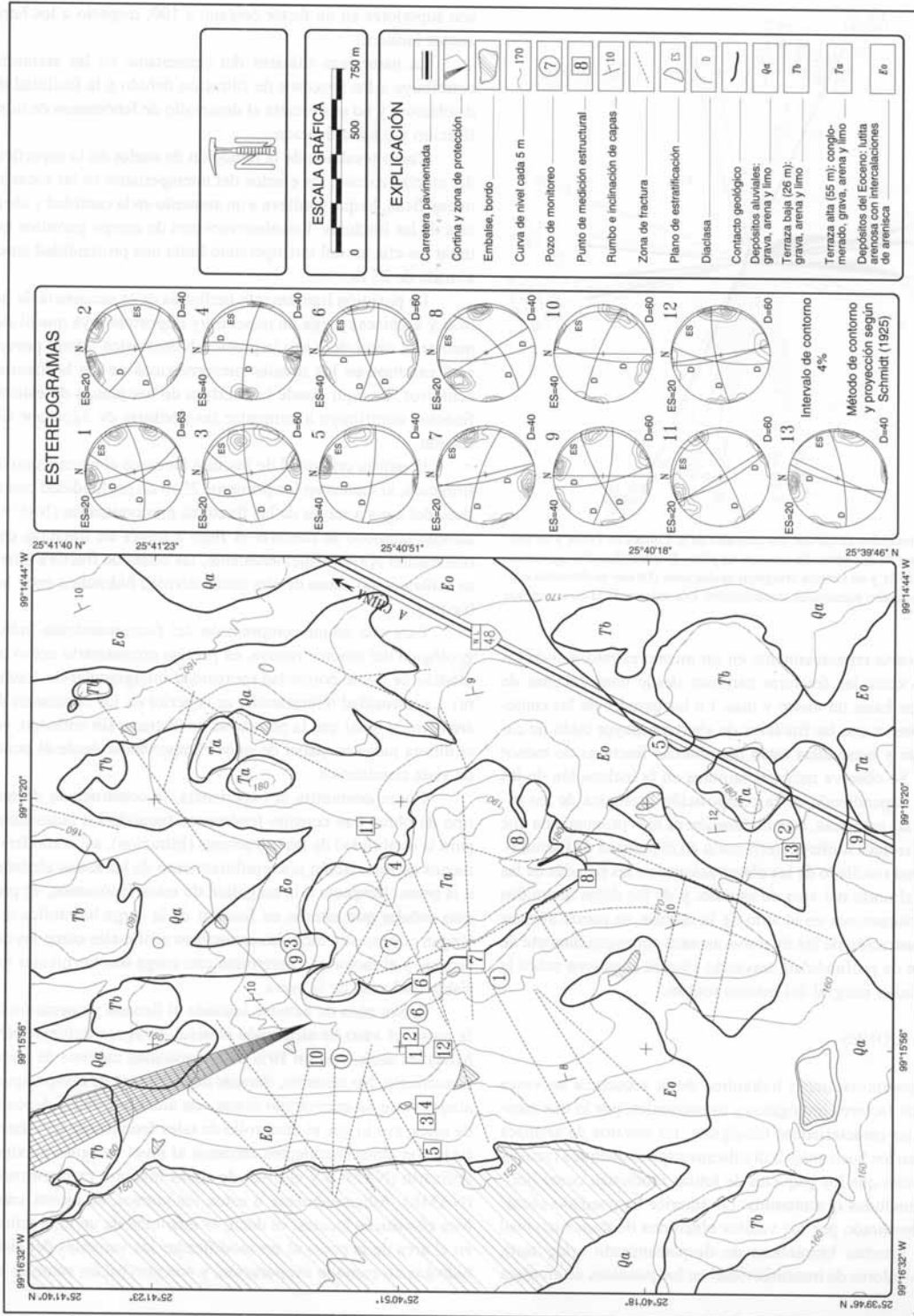


Figura 8. Mapa geológico-estructural del área Loma Los Pozos, China, Nuevo León, México.

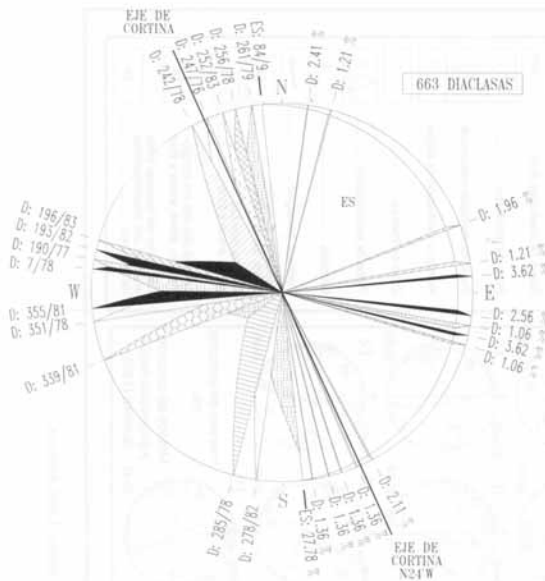


Figura 9. Principales elementos estructurales de la Loma Los Pozos y su relación con el eje de la cortina. Se muestra un plano de estratificación ligeramente inclinado (ES), y un sistema ortogonal de diaclasas (D) con su dirección e inclinación, así como porcentajes frecuenciales. Los valores de la dirección son azimutales.

fracturas varía repentinamente en un mismo estrato, donde las distancias entre las fracturas cambian desde unas decenas de centímetros hasta un metro y más. En las paredes de las canteras, se observa que las fracturas de abertura mayor están de cada 5 a 7 m y entre ellas están distribuidas fracturas de menor amplitud. Se observa también cambios en la inclinación de las fracturas, dependiendo de la composición litológica de los estratos; en las areniscas, esta inclinación es más pronunciada que en los horizontes lutíticos (refracción en el proceso de fractura).

Como resultado de las observaciones en las paredes de las canteras, al norte del área de estudio, y de los datos obtenidos de las perforaciones en el sitio de la cortina, se puede afirmar que la penetración de las fracturas alcanza aproximadamente de 15 a 20 m de profundidad, trayendo efectos negativos sobre la permeabilidad integral del macizo rocoso.

CONCLUSIONES

El comportamiento hidráulico de la secuencia eocénica depende de factores litológicos y estructurales, por lo que atendiendo a las características litológicas, los estratos de arenisca constituyen los horizontes hidráulicamente conductores (acuíferos), en tanto que los paquetes de lutitas funcionan como horizontes acuícludos o acuitardos. Lo anterior ha quedado plenamente demostrado por los valores obtenidos de transmisividad mediante pruebas hidráulicas de desplazamiento (*slug test*), donde los valores de transmisividad en los paquetes de arenisca

son superiores en un factor cercano a 100, respecto a los horizontes lutíticos.

La naturaleza calcárea del cementante en las areniscas contribuye a los procesos de filtración debido a la facilidad de disolución, y no se descarta el desarrollo de fenómenos de tubificación y/o karstificación.

Como resultado de la remoción de suelos en la superficie del macizo rocoso, los efectos del intemperismo en las rocas se intensifican, lo que conlleva a un aumento en la cantidad y abertura de las fracturas. Las observaciones de campo permiten estimar los efectos del intemperismo hasta una profundidad aproximada de 25 m.

La posición ligeramente inclinada de la secuencia de lutitas y areniscas juega un papel muy importante, ya que al aumentar el nivel del vaso la presión hidrostática lateral provocará cambios en los niveles piezométricos de los horizontes acuíferos. Es aquí donde la abertura de los planos de estratificación contribuye a aumentar las pérdidas de agua por filtración.

El patrón ortogonal de fractura favorece el mecanismo de filtración, al menos en los primeros 25 m de profundidad con el flujo del agua a través de las fracturas predominantes (N85°E), aunque tampoco se descarta el flujo a través de fracturas con orientación N9°W. Adicionalmente, las zonas de fractura intensa actúan como zonas de alta conductividad hidráulica entre los bloques.

Para una mejor comprensión del funcionamiento hidrogeológico del macizo rocoso, es preciso considerarlo como un modelo de doble porosidad (porosidad intergranular-de fractura). La porosidad intergranular es superior en los horizontes de arenisca, al igual que la porosidad de fractura; sin embargo, esta última juega un papel de mayor importancia desde el punto de vista cuantitativo.

Como demuestra la experiencia, la construcción de este tipo de obras trae consigo fenómenos secundarios indeseables para la estabilidad de las estructuras (filtración), así como fenómenos de inundación y/o ensalitramiento de las zonas aledañas a la presa. Respecto a la magnitud de estos fenómenos, es preciso señalar que estarán en función de la carga hidráulica que tengan que resistir, tanto las estructuras artificiales como las naturales, y el factor que determina esta carga son los niveles variables del vaso de la presa.

A tres años de haberse iniciado el llenado y operación de la presa, el vaso ha alcanzado el nivel de aguas mínimo (NÁMIN); es decir, casi un 10% de la capacidad máxima de almacenamiento. No obstante, durante inspecciones de campo aguas abajo, ya se ha encontrado zonas con alta humedad y depósito de sales, por lo que el desarrollo de tales fenómenos será inevitable con almacenamientos cercanos al nivel de aguas máximo ordinario (NÁMO) y el nivel de aguas máximo extraordinario (NÁME). Adicionalmente a estos fenómenos, se espera cambios climáticos locales; es decir, la aparición de un microclima en el área de la presa al ser modificadas las variables del ciclo hidrológico como la evaporación, y son previsible cambios en

las poblaciones vegetativas, como la desaparición de especies endémicas y la migración de especies animales.

Con el aumento del volumen de almacenamiento del vaso, las filtraciones aumentarán por la activación o aparición de nuevas fracturas (desarrolladas por intemperismo y karstificación), disminuyendo a la vez el volumen neto del vaso e impactando directamente el gasto de suministro del abastecimiento de agua potable.

Las discontinuidades litológicas y estructurales del macizo rocoso generan filtraciones en la zona de la cortina y el vaso de la presa, impactando de manera directa la estabilidad del conjunto presa-cimiento, y por consecuencia el abastecimiento de agua potable para lo cual fue construida.

Como medida de saneamiento a las filtraciones, se propone desarrollar un programa de inyecciones con el fin de disminuir las filtraciones existentes y futuras, así como mantener la seguridad de la estabilidad de la cortina. Es así como se aumentará el suministro de agua potable diseñado de la presa y cumplirá también con su fin de abastecimiento como fuente superficial del Sistema Regional de Abastecimiento China-Monterrey.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a todas aquellas personas que en alguna forma colaboraron en el presente artículo. De igual manera, se agradece a la Universidad Autónoma de Nuevo León el apoyo logístico y técnico brindado a través de la Facultad de Ciencias de la Tierra (Linares); al CONACYT por su apoyo económico, que permitió concluir este trabajo de investigación. Muy especialmente a los árbitros por su minuciosa, crítica y acertada revisión para el mejoramiento del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Echánove-Echánove, Óscar, 1986, Geología petrolera de la Cuenca de Burgos: parte 1, Consideraciones geológico-petroleras: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 38, núm. 1, p. 3-39.
- Galloway, W.E.; Bebout, D.G.; Fisher, W.L.; Dunlap, J.B., Jr.; Cabrera-Castro, R.; Lugo-Rivera, J.E.; y Scott, T.M., 1991, Cenozoic, in Salvador, Amos, ed., The Gulf of Mexico Basin: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, v. J, p. 245-324.
- INEGI, 1986, Síntesis geográfica del estado de Nuevo León: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Síntesis, 170 p.
- Kennedy, William, 1892, A section from Terrell, Kaufman County, to Sabine Pass on the Gulf of Mexico: Texas Geological Survey, Annual Report 3, p. 41-125.
- Mullerried, F.K.G., 1946, Geología del estado de Nuevo León: Linares, Nuevo León, Universidad de Nuevo León, Anales del Instituto de Investigación Científica, v. 1, núm. 2, p. 39-83.
- Penrose, R.A.F., Jr., 1890, A preliminary report on the geology of the Gulf Tertiary of Texas from the Red River to the Rio Grande: Texas Geological Survey, Annual Report 1, p. 3-101.
- Pettijohn, F.J., 1949, Sedimentary rocks: Nueva York, Harper, 526 p.
- SARH, 1979, Informe geológico del proyecto "El Cuchillo" sobre el río San Juan, municipio de China, Estado de Nuevo León: Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Informe interno, 70 p.
- Schmidt, Walter, 1925, Gefügestatistik: Tschermak's mineralogische und petrographische Mitteilungen, N.F. Bd. 38, p. 392-423.
- UANL-UEM, 1993a, Investigaciones ingeniero-geológicas y geofísicas en el área de la presa "El Cuchillo": Universidad Autónoma de Nuevo León-Universidad Estatal de Moscú, Informe técnico, 41 p.
- 1993b, Estudios geofísicos en la Loma Los Pozos, presa "El Cuchillo": Universidad Autónoma de Nuevo León-Universidad Estatal de Moscú, Informe técnico, 50 p.
- Wendlandt, E.A., y Knebel, G.M., 1929, Lower Claiborne of east Texas, with special reference to Mount Sylvan dome and salt movements: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 13, p. 1347-1375.

Manuscrito presentado: 10 de marzo de 1997

Manuscrito aceptado: 23 de enero de 1998