



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**ESTUDIO GEOTÉCNICO – GEOLÓGICO PARA LA
CONSTRUCCIÓN DEL GASODUCTO LOS RAMONES
FASE II, TRAMO NORTE.**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
(GEOTECNIA)**

Presenta:

DANIEL PINEDA TAPIA

Asesor de tesis:

DR. GABRIEL JIMÉNEZ SUÁREZ



BUAP

Oficio SIEP No. 4230/2015

C. DANIEL PINEDA TAPIA

*Maestría en Ingeniería, Opción terminal Geotecnia
Presente.*

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de cambio de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **“Estudio geotécnico-geológico para la construcción del gasoducto Los Ramones Fase II, Tramo Norte”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Geotecnia. Asignándose como Asesor de Tesis al Dr. Gabriel Jiménez Suárez.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Puebla a 10 de diciembre de 2015

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. Dr. Gabriel Jiménez Suárez. Asesor tema tesis.

C.c.p. Archivo

GJS/MFC/dsm.

af

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

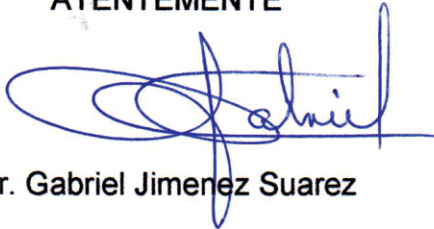
M.I. FERNANDO LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE.

H. Puebla de Z. 9 de abril de 2016

El suscrito Dr. Gabriel Jimenez Suarez, director de la tesis intitulada ESTUDIO GEOTÉCNICO – GEOLÓGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL GASODUCTO LOS RAMONES FASE II, TRAMO NORTE, elaborada por el Ing. Daniel Pineda Tapia egresado de la Maestría en Ingeniería opción terminal geotecnia. Le informo que después de haber revisado el contenido temático y la metodología, dicha tesis cumple con la calidad y nivel de maestría, por lo cual autorizo la impresión de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE



Dr. Gabriel Jimenez Suarez



ÍNDICE

RESUMEN	1
CAPITULO I. ANTECEDENTES	2
CAPITULO II. GASODUCTO LOS RAMONES FASE II, TRAMO NORTE	4
II.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	
II.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO	
II.3 OBJETIVOS Y ALCANCES	
CAPITULO III. GEOLOGÍA DEL SITIO	8
III.1 FISIOGRAFÍA	
III.2 GEOLOGÍA REGIONAL	
III.3 GEOLOGÍA LOCAL	
CAPITULO IV. TRABAJOS DE EXPLORACIÓN	32
IV.1 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO SUPERFICIAL	
IV.2 POZOS A CIELO ABIERTO	
IV.3 SONDEOS ROTATORIOS	
IV.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	
IV.5 TENDIDOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA Y VIBRACIÓN AMBIENTAL	
CAPITULO V. INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA	45



CAPITULO VI. DISEÑO GEOTÉCNICO DE LAS ESTACIONES DE COMPRESIÓN	57
VI.1 ESTACIÓN DE COMPRESIÓN I	
VI.1.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS	
VI.1.2 PRESIÓN ADMISIBLE EN ROCA	
VI.1.3 INFLUENCIA DEL TIPO DE ROCA	
VI.1.4 INFLUENCIA DEL GRADO DE METEORIZACIÓN	
VI.1.5 INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO ENTRE LITOCLASAS	
VI.1.6 ASENTAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA	
VI.1.7 RESULTADOS OBTENIDOS	
VI.2 ESTACIÓN DE COMPRESIÓN II	
VI.2.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS	
VI.2.2 ANÁLISIS DE CIMENTACIÓN PROFUNDA	
VI.2.2.1 CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA	
VI.2.2.2 CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE	
VI.2.2.3 CAPACIDAD DE CARGA POR TENSIÓN	
VI.2.3 ASENTAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA	
VI.2.4 MÓDULOS DE REACCIÓN VERTICAL	
VI.2.5 MÓDULOS DE REACCIÓN HORIZONTAL	
VI.2.6 RESULTADOS OBTENIDOS	
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	82



RESUMEN

En el presente documento se describe el estudio de campo para la construcción del Gasoducto Los Ramones Fase II, tramo Norte, en el cual se presentan una serie de metodologías y estudios de campo que permitieron definir el trazo definitivo del gasoducto. Los trabajos de campo realizados, forman parte de un programa de exploración geológica y geotécnica, a fin de recabar toda la información necesaria para obtener la clasificación de suelos y rocas, y definir las propiedades mecánicas del suelo por donde se alojara la tubería y se cimentaran las estructuras de compresión.

Se realizó un recorrido a pie a lo largo de la línea del gasoducto con la finalidad de reconocer los rasgos geológicos de la zona de estudio, siempre realizando el muestreo de suelos y rocas del tipo alterado e inalterado mediante trabajos de exploración, tales como pozos a cielo abierto, sondeos rotatorios y de penetración estándar, sondeos eléctricos verticales y de refracción sísmica; conjunto de metodologías necesarias para el reconocimiento del subsuelo de proyecto.

La información obtenida de campo, sirvió para rectificar el trazo original del gasoducto, debido a que éste, cruzaba por una falla geológica activa, afectando la seguridad y funcionalidad de la línea.

El muestreo del tipo alterado e inalterado sirvió para ejecutar pruebas índice y mecánicas en el laboratorio, de donde se obtuvieron características y parámetros mecánicos del subsuelo, necesarios para el diseño de la cimentación de las Estaciones de Compresión I y II.



CAPITULO I ANTECEDENTES

Para cubrir el rezago en el suministro de gas natural en el país, se ha proyectado la construcción del **Gasoducto Los Ramones Fase II, tramo Norte**, que consiste en la transportación del gas por medio de ductos de 42” de diámetro que cruzarán por los estados de Nuevo León, Tamaulipas y San Luis Potosí.

Se ha contemplado un trazo preliminar de 451.57 kilómetros que sigue una dirección predominante de norte a sur, iniciando en el municipio Los Ramones, Estado de Tamaulipas, dirigiéndose a la localidad de Linares, Nuevo León, para flexionar al poniente y cruzar la Sierra Madre Oriental, proseguir en dirección sur hasta finalizar en el municipio de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, ver Figura I.1.

Para el análisis y reconocimiento geológico del trazo preliminar del ducto, se realizaron diversos trabajos de campo, tales como el reconocimiento geológico superficial, sondeos mixtos y pozos a cielo abierto; entre otros métodos de tipo indirectos como sondeos eléctricos verticales y tendidos de refracción sísmica. Para lograr la clasificación del suelo bajo el criterio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se realizó la recuperación de muestras alteradas e inalteradas de los sondeos mixtos y de los pozos a cielo abierto; misma actividad que nos permitió conocer las características índice del suelo.

Para un mejor estudio y análisis de la traza del ducto, se dividieron cuatro subtramos, los cuales se describen a continuación:

SPREAD 1.- Inicia en el kilómetro 0+000, en el Municipio Los Ramones y finaliza en el kilómetro 177+000, al pie de la Sierra Madre Oriental.



CAPITULO I. ANTECEDENTES

SPREAD 2.- Abarcando del kilómetro 177+000 al 210+000, subtramo que cruza la Sierra Madre Oriental.

SPREAD 3.- Comprende del kilómetro 210+000 al 309+000, intervalo que corresponde a la parte final de la Sierra Madre Oriental y finaliza en el Municipio de Matehuala, San Luis Potosí.

SPREAD 4.- Último subtramo que cubre del kilómetro 309+000 al 451+565, del Municipio de Matehuala al de Villa Hidalgo, Estado de San Luis Potosí.



Figura I.1 Trayecto del Gasoducto los Ramones Fase II Norte



CAPITULO II

GASODUCTO LOS RAMONES FASE II, TRAMO NORTE

II.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto Gasoducto Los Ramones Fase II, Tramo Norte, consta de la construcción de 451.57 km de tubería de acero al carbón de 42” de diámetro, cuyo trayecto inicia en el cadenamamiento 0+000, ubicado al Norte del Municipio Los Ramones, en el estado de Nuevo León; de éste punto, se dirige hacia el Sur, cruzando por los Municipios de Guadalupe, General Terán, Montemorelos y al poniente de la ciudad de Linares, Nuevo León, en donde se ubicará la Estación de Compresión I; continuando su trayecto por la comunidad de Hidalgo, Tamaulipas, y nuevamente se incorporará al estado de Nuevo León en el municipio de Dr. Arroyo, en donde se ubicará la Estación de Compresión II. A partir de éste punto, se dirige hacia el Estado de San Luis Potosí, pasando por el Sur del Municipio de Matehuala, hasta el municipio de Villa Hidalgo, San Luis Potosi, finalizando en el kilómetro 451+565.

II.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

El proyecto para la construcción del Gasoducto, inicia en la estación de medición y regulación (EMR) existente en el Municipio Los Ramones, Estado de Nuevo León, en ese punto se realizara la interconexión entre la línea actual y la nueva. A lo largo de los 451.57 kilómetros, existen diversas estructuras fijas descritas a continuación:

Estaciones de compresión: Son estructuras cuya finalidad es la medición, regulación y generación de energía de compresión dentro de la tubería. El gasoducto cuenta con dos Estaciones de compresión, I y II, ubicadas en los kilómetros 142+936 y 260+575 respectivamente. El arreglo arquitectónico de las estaciones de compresión es un prototipo que está conformado básicamente por turbocompresores, tanques



condensadores, casetas de maquinaria para aire comprimido, sistemas de tratamiento de aguas aceitosas así como sistemas de energía eléctrica de emergencia.

Estaciones de válvulas: El gasoducto Los Ramones Fase II, contara con 16 válvulas de interconexión cuya función principal será la de realizar el control del flujo de gas hacia los diferentes puntos de seccionamiento, cada una de las válvulas contara con dos transmisores indicadores de presión; la acción de cierre de las válvulas podrá hacerse vía remota con confirmación de cierre y el restablecimiento a la posición normalmente abierta de la válvula se podrá realizar de manera local. Adicionalmente, como medida de seguridad, las válvulas estarán equipadas con un dispositivo local de ruptura de línea “Line Break” que estará integrado al actuador de las mismas para permitir el cierre cuando sea detectada una caída súbita de presión.

PRESIÓN DE DISEÑO

CONCEPTO	UNIDADES	
	KPa	Kg/cm ²
Presión de Diseño	8,618.00	87.88
Presión de Operación Máxima	8,542.00	87.11
Máxima Presión de Operación Permisible	8,618	87.88

CAPACIDAD DEL SISTEMA

CONCEPTO	UNIDADES	
	Flujo volumétrico	Flujo volumétrico
	(millones sm ³ /día)	(MMPCSD)
Demanda diaria del sistema	56.6	2001
Capacidad diaria del sistema	57	2014



Notas:

1. MMPCSD = Millones de pies cúbicos estándares por día @ 15.5 °C y 101.325 KPa (1.033 Kg/cm²).
2. Millones m³/día = Millones de metros cúbicos por día @ 15.5 °C y 101.33 KPa (1.033 Kg/cm²).
3. Se considera el flujo adicional de Gas Natural para su uso como gas combustible.

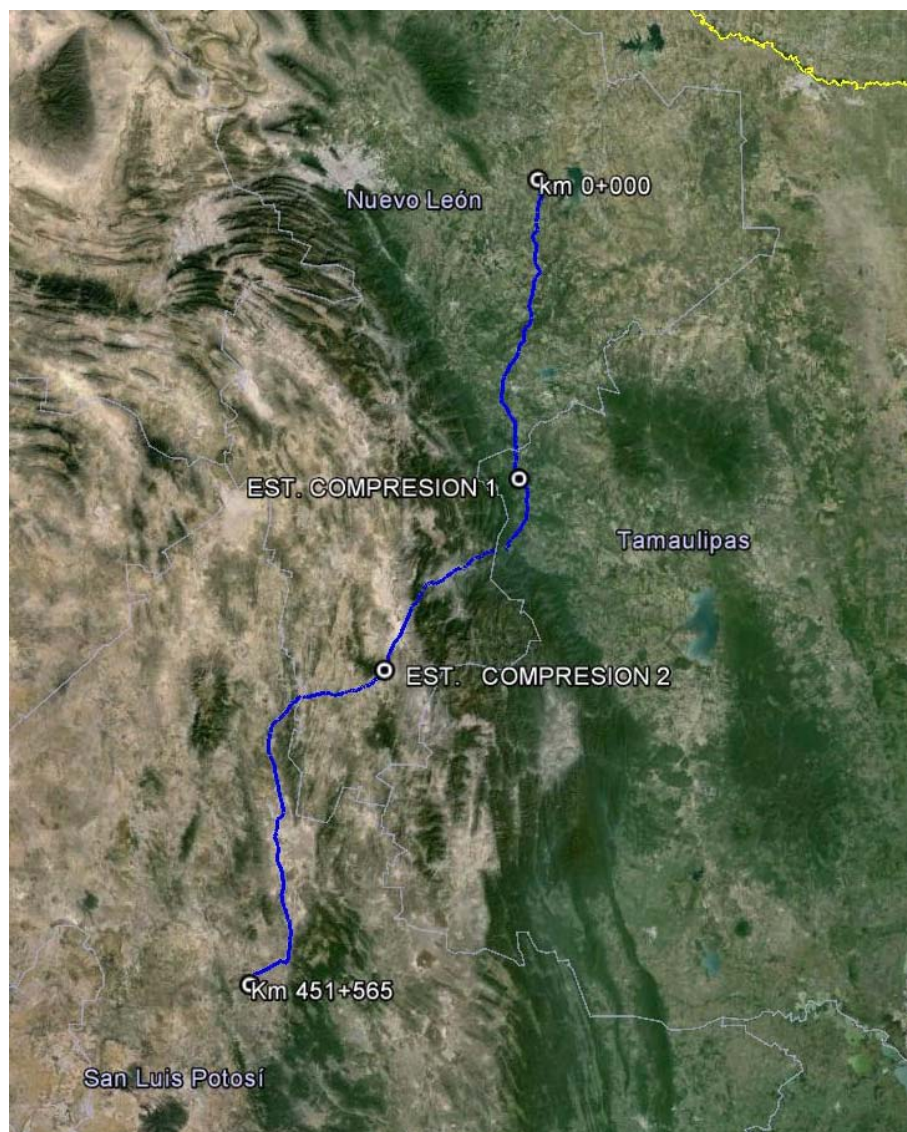


Figura II.1 Ubicación Satelital del trayecto del Gasoducto Los Ramones Fase II



II.3 OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo final es el de evaluar las condiciones geológicas y geotécnicas del subsuelo donde se desplantara la línea del gasoducto, buscando un desplante firme, resistente y con un comportamiento mecánico adecuado para evitar daños severos a la tubería y a las Estaciones de Compresion, evitando su desplante en un suelo de comportamiento inestable que pudiera provocar efectos de expansión, asentamientos o fallas geológicas.

Los alcances del presente estudio son los siguientes:

- Reconocimiento geológico
- Trabajos de exploración geotécnica:
 - Sondeos mixtos
 - Sondeos eléctricos verticales
 - Tendidos de refracción sísmica
- Pruebas de laboratorio
- Trabajos de gabinete:
 - Interpretación geológica y geotécnica del trazo del gasoducto y del área donde se construirán las Estaciones de Compresión I y II
 - Interpretación de los resultados de laboratorio
 - Verificación geológica y corrección del trazo del gasoducto
 - Diseño de cimentación para Estaciones de Compresión I y II



CAPITULO III GEOLOGÍA DEL SITIO

III.1 FISIOGRAFÍA

De lo observado en el reconocimiento geológico y apoyados en el uso de cartas geográficas, se observó que el trazo del gasoducto atraviesa tres provincias fisiográficas del país: Llanura Costera del Golfo Norte, Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental (Raisz, 1959), las cuales se describen a continuación:

LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE

Esta provincia fisiográfica se extiende por la costa del Golfo desde el Río Bravo, en el tramo que va de Reynosa, Tamaulipas, a su desembocadura hasta la zona de Náutla, Veracruz, dentro del Territorio Nacional que limita al noroeste con la provincia de la Gran Llanura de Norteamérica, al Oeste con la Sierra Madre Oriental, al este con el Golfo de México y al sur con la provincia del Eje Neo volcánico.

Al norte del Río Bravo se introduce en el territorio de los estados norteamericanos de Texas y Louisiana, abarca parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo y Veracruz. La provincia comienza en sus límites occidentales, presentando una elevación hasta de 400 m.s.n.m. A diferencia de la Llanura Costera del Golfo Sur, integra claramente una costa de emersión, como lo indican los siguientes rasgos:

Entre los materiales aflorantes dominan los sedimentos marinos no consolidados (arcillas, arenas y grava-arena), cuya edad aumenta conforme incrementa su distancia respecto de la costa (los hay desde Cuaternarios, pasando por Plioceno, Oligoceno y



Eoceno del Terciario, hasta Cretácicos superiores en las proximidades de la Sierra Madre Oriental).

Los ríos que desembocan en sus costas son el Río Bravo, Soto La Marina, Tamesí, Pánuco, Tuxpan, Cazones, Tecolutla, Nautla, entre otros que no depositan aluviones en su territorio.

SIERRA MADRE ORIENTAL

La segunda provincia relacionada con la zona norte de nuestro proyecto, La Sierra Madre Oriental, es una cadena montañosa de aproximadamente 1,350 kilómetros de longitud que se extiende desde el sur del Río Bravo y corre paralela al Golfo de México hasta unirse con el Eje Neo volcánico. Esta sierra tiene su origen con el plegamiento de rocas sedimentarias marinas de edad mesozoica y del Terciario Inferior; atraviesa los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Texas, San Luis Potosí, Hidalgo, Tlaxcala, Veracruz, entre otros.

El punto de elevación más alto de la Sierra Madre Oriental es un empate entre el Cerro San Rafael, Cerro el Morro, Cerro el Potosí y Sierra de la Marta con 3,700 metros de altura, está constituida fundamentalmente por un conjunto de sierras de estratos plegados. Dichos estratos son de rocas marinas antiguas (Cretácico y del Jurásico Superior), entre las que predominan las calizas, quedando en segundo término las areniscas y las lutitas. Las rocas ígneas son poco comunes, pero rumbo a Teziutlán, Puebla, hay rocas volcánicas que sepultan las estructuras plegadas.

La Provincia se compone de 8 subprovincias de las cuales 2 de ellas contienen prácticamente en su totalidad el trazo del gasoducto, motivo del presente estudio. Estas subprovincias son: Gran Sierra Plegada y Sierras y Llanuras Occidentales.



La primera de estas dos subprovincias, incluye el prominente rasgo orográfico conocido como Curvatura de Monterrey, formada por una serie de sierras predominantemente calizas, subparalelas y curvadas, separadas entre sí por estrechos valles intermontanos. Esta región se ubica al este de Saltillo y sur de Monterrey, también se conoce como Anticlinorio de Arteaga (un anticlinorio es la sucesión estructural de pliegues, que juntos integran un anticlinal general). La parte oeste del Anticlinorio de Arteaga es lo que de esta subprovincia corresponde a Coahuila.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales se localiza al oeste de la Gran Sierra Plegada, en ella predominan las sierras alargadas, particularmente constituidas por calizas, con orientación general norte-sur, y enlazadas entre sí por sierras de menor longitud que siguen una dirección similar o que les son oblicuas. Los sistemas de topoformas que se encuentran en esta subprovincia son: en el norte, las sierras complejas y las bajadas, aunque hay pequeñas llanuras y valles.

MESA DEL CENTRO

La Mesa Central de México fue reconocida como provincia fisiográfica por Raisz (1959), quien la definió como: “una cuenca rodeada por montañas más elevadas, más alta y más plana que la provincia Cuencas y Sierras. En lugar de sierras elongadas, ésta tiene áreas poco elevadas, principalmente disectando rocas volcánicas antiguas. Al observar la configuración orográfica de la República Mexicana es evidente la existencia de dicha provincia, localizada hacia la región central del país. Es ocupada parcial o totalmente por los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, México, Tlaxcala, Puebla, Jalisco, Michoacán, y el Distrito Federal.



Dentro de la Meseta Central es posible reconocer dos regiones. La región sur, donde se localizan las cotas más elevadas, las elevaciones superan fácilmente los 2,000 m.s.n.m. con excepción del valle de Aguascalientes. Esta región es montañosa, cubierta en su mayor parte por rocas volcánicas cenozoicas (Nieto-Samaniego et al, 1999), muestra un estado de erosión mucho más activo que la región norte, con desniveles más pronunciados y los rasgos estructurales, principalmente fallas normales, se observan menos erosionados. En contraste, la región norte, que es la de mayor tamaño, muestra un estado de erosión más avanzado con grandes cuencas continentales rellenas de sedimentos aluviales y lacustres, algunas de ellas endorreicas.

En la imagen III.1 se pueden identificar las regiones en las que se divide el territorio nacional.



Figura III.1 Regiones Fisiográficas de la República Mexicana



III.2 GEOLOGÍA REGIONAL

El cinturón plegado y cabalgado de la Sierra Madre Oriental (SMO), corresponde a una cadena montañosa situada en el oriente de México, extendiéndose desde Parral, Chihuahua hasta Zongolica, Veracruz; está compuesta de rocas sedimentarias marinas clásticas y calcáreas del Mesozoico que sobreyacen a rocas del Precámbrico, Paleozoico y Mesozoico que integran el basamento del NE de México.

Esta cadena montañosa representa a un cinturón plegado y cabalgado generado principalmente por deformación de cobertura temprana y de forma subordinada por la influencia de deformación de basamento tardía (Padilla y Sánchez, 1982; Marrett y Aranda-García, 1999; Eguiluz de Antuñano et al., 2000; Zhou et al., 2006).

El basamento de la SMO presenta rocas que varían en litologías y edades. El paquete sedimentario que compone a la SMO fue depositado durante el desarrollo de una margen pasiva relacionada con la formación del Golfo de México.

A partir del Triásico Tardío hasta el Berriasiano en el NE de México, inició la fragmentación de la Pangea que condujo a la generación de fosas y pilares que fueron paulatinamente invadidos por el mar y que controlaron ampliamente las facies sedimentarias marinas a partir del Calloviano, depositándose primero gruesas secuencias de evaporitas y posteriormente rocas calcáreo-arcillosas, calcáreas y finalmente clástico-calcáreas durante la regresión marina regional disparada por el inicio de la orogenia Laramide en el norte de México (Padilla y Sánchez, 1982; Michalzik y Schumann, 1994; Goldhammer et al., 1991; Goldhammer, 1999).



El depósito relacionado al rifting consiste de secuencias de capas rojas y acumulaciones volcánicas del Grupo Huizachal (Mixon et al., 1959). La sedimentación marina empezó con el depósito de gruesas secuencias de evaporita dentro del Golfo de México durante el Calloviano y se extendieron hasta el mismo Kimmeridgiano en el noreste de México (Minas Viejas-Olvido; Longoria, 1984; Goldhammer y Johnson, 2001). Estos depósitos jugaron un papel importante ya que funcionaron como un despegue regional controlando las geometrías de las estructuras generadas por acortamiento asociadas a la orogenia.

Durante el Kimmeridgiano y Tithoniano, el depósito de la Formación La Casita representa un periodo de influjo clástico mayor, su distribución y espesor varía geográficamente en función de la proximidad con el Bloque de Coahuila. Durante el período Berriasiano-Valanginiano inició el depósito de la Formación Taraises constituida de caliza y margas de ambiente de plataforma marina abierta, salvo en el área de Galeana, N.L., donde aflora el miembro Galeana, compuesto de arenisca de estratos medianos a gruesos de ambiente deltáico con sedimentos provenientes de la Isla de Terán.

El depósito de la Formación La Casita representa un periodo de influjo clástico mayor, su distribución y espesor varía geográficamente en función de la proximidad con el Bloque de Coahuila. Durante el período Berriasiano-Valanginiano inició el depósito de la Formación Taraises constituida de caliza y margas de ambiente de plataforma marina abierta, salvo en el área de Galeana, N.L., donde aflora el miembro Galeana, compuesto de arenisca de estratos medianos a gruesos de ambiente deltáico con sedimentos provenientes de la Isla de Terán.

La Formación Cuesta del Cura, de edad Albiano tardío al Cenomaniano, consiste de carbonato pelágico de aguas profundas, lutita acumulada enfrente del borde de la plataforma e intercalaciones con bandas de pedernal. Para finales del Cenomaniano al Turoniano, Eguiluz de Antuñano y Campa (1982) reconocieron cambios en las facies



sedimentarias en el NE de México, al parecer relacionadas con un levantamiento regional; lo anterior, dio lugar a la deposición de la secuencia de carbonato de agua profunda con material arcilloso de la Formación Agua Nueva en la SMO.

Posteriormente, en el Coniaciano-Santoniano, un ligero cambio en las condiciones tomó lugar y se depositaron carbonatos y lutitas de agua somera de la Formación San Felipe. Finalmente, para el Campaniano-Maastrichtiano, en una etapa sin-orogénica (orogenia Laramídica) se depositaban la lutita de la Formación Méndez, todos estos sedimentos provenientes de las áreas continentales de la parte oeste de México.

En la figura III.2 se muestra la correlación estratigráfica para las cuatro cuencas que se han definido en el noreste de México: Plataforma de Valles – San Luis Potosí, Sierra Madre Oriental (o Cuenca Mesozoica), Cuenca Tampico – Misantla y Cuenca de Burgos.

Así, para la plataforma Valles–San Luis Potosí, se tiene secuencias arrecifales y de talud para las formaciones El Abra y Tamabra y de cuenca somera y profunda para las formaciones Agua Nueva y San Felipe.

La Sierra Madre Oriental, en el Cretácico, inicia con él depósito calcáreo–arcilloso de la Formación Taraises; sobreyaciéndola concordantemente se tiene caliza de plataforma, talud y cuenca de la Formación Cupido, siendo correlacionable para la cuenca Tampico-Misantla con la Formación Tamaulipas Inferior; en ese mismo orden y como unidades correlacionables se tendrían la Formación La Peña con el Horizonte Otates; calizas de la Formación Aurora y Cuesta del Cura, correlacionable con la Formación Tamaulipas Superior.



En toda la región se tiene como cubierta común a las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez del Cretácico Superior, así como las formaciones que corresponden a la Cuenca de Burgos.

Para el Terciario, en las cuencas Tampico-Misantla y Burgos, se desarrolló una gruesa secuencia de depósitos de ambiente mixto, representados por areniscas, limonitas y lutitas en el marco de una franca regresión marina, con algunas transgresiones. Estas unidades se exponen en la provincia fisiográfica del Golfo de México.

Por otro lado, si bien las rocas ígneas de edad Oligoceno (tanto intrusivas como extrusivas) también se hacen presentes en la región; no quedan expuestas en las cercanías del trayecto del gasoducto.

El levantamiento del cinturón de la SMO ha sido interpretado como producto de un décollement regional y despegue de la secuencia marina del Mesozoico superior, disparado por la acreción del Terreno Guerrero-Alisitos y la somerización del ángulo de subducción que controló la migración del magmatismo de arco del oeste de México hacia la parte interna del continente en el intervalo de tiempo entre los 80 y 40 Ma, semejante a lo que ocurrió en el SW de los Estados Unidos de Norteamérica (Coney, 1976; Coney y Reynolds, 1977; Dickinson y Snyder, 1978; Clark et al., 1981); lo anterior, aceleró la regresión marina regional en el NE de México. Las estructuras asociadas al décollement representan una deformación típica de cobertura culminando con el cabalgamiento de la secuencia sobre altos de basamento hacia el NE en Chihuahua, hacia el norte en el sur de Coahuila y hacia el E-NE entre Monterrey y Teziutlán, Puebla.



CAPITULO III. GEOLOGIA DEL SITIO

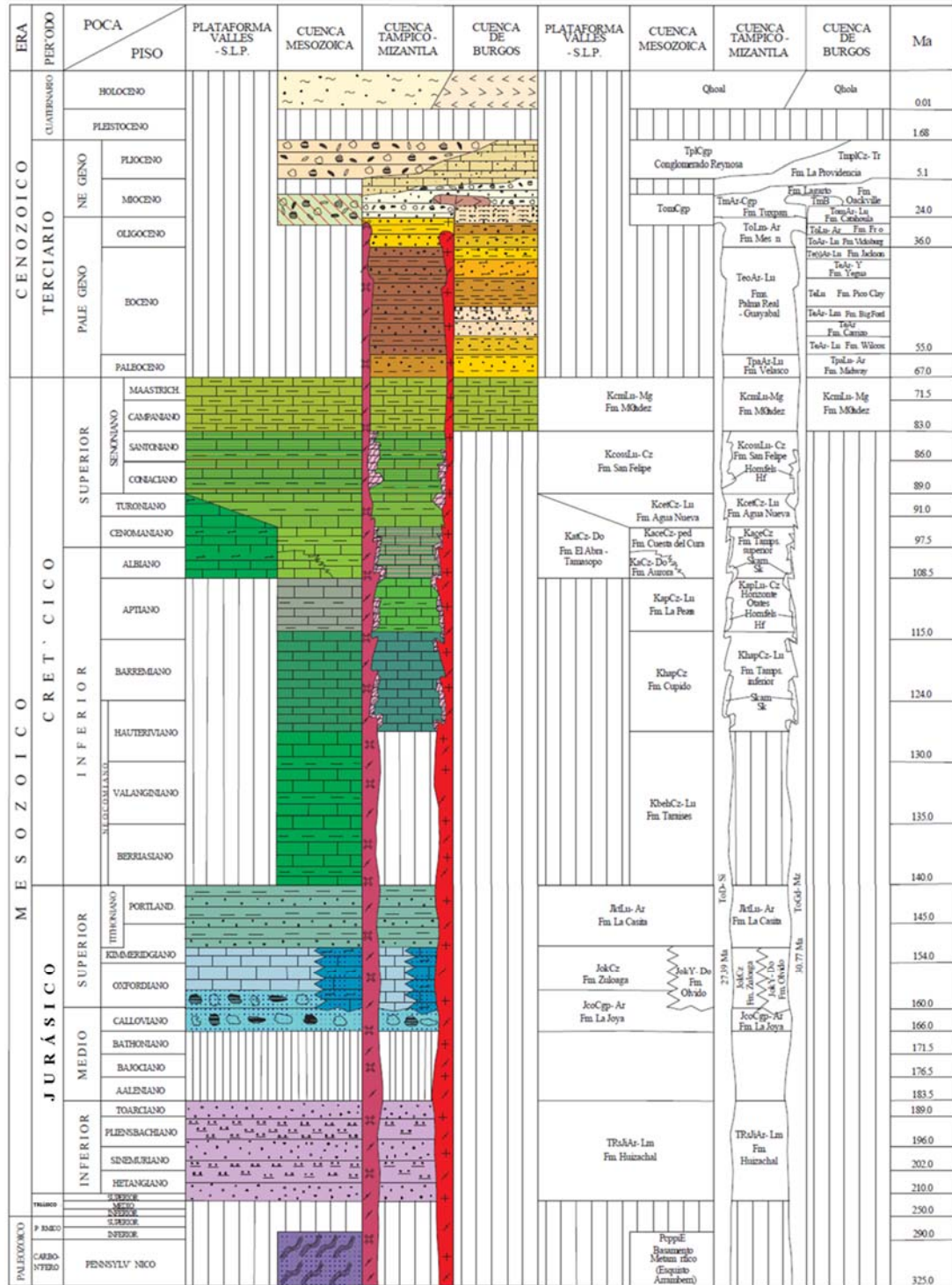


Figura III.2 Correlación estratigráfica de la región (Consejo de Recursos Minerales, 2004).



III.3 GEOLOGÍA LOCAL

Se presenta la geología local de acuerdo a la división establecida por Spread, describiendo la columna estratigráfica desde las unidades litológicas más antiguas a las más recientes.

SPREAD 1, del Km. 0+000 al 177+000

CRETÁCICO

FORMACIÓN SAN FELIPE, (Lutita- Caliza)

Consiste de caliza arcillosa y margas hacia su base, presenta un color verdoso, presenta escasos nódulos de pedernal negro bien estratificado en capas de 0.15 a 0.30 m que en ocasiones supera 1.0 m de espesor, hacia la parte media está intercalada con lutitas (bentonítica) de color gris a verde de 0.02 a 0.05 m de espesor y alterna con capas de arenisca y grauvaca de color verde, hacia la cima predomina lutita y arenisca, lo cual marca su contacto transicional con la Formación Méndez.

Se correlaciona con las formaciones Parras y Caracol en la Cuenca de Parras y con la Formación Austin en el golfo de Sabinas. Las rocas de la Formación San Felipe evidencian un ambiente de depósito de mar abierto, con notable influencia de material bentonítico (arcillas producto de alteración de ceniza volcánica) proveniente del arco magmático del occidente.

FORMACIÓN MÉNDEZ, KcmLuMg (Lutita-Marga)

Consiste de una secuencia de lutitas calcáreas, fisiles, de color verde amarillento, deleznales y ligeramentes caolinizadas; presentan esquistosidad de fractura, que con el intemperismo se disgrega en forma de punta de lápiz, con intercalaciones de margas, limolitas, calizas, areniscas y delgadas capas de bentonita, su estratificación varía de



laminar a mediana y llega a tener un espesor de 0.40 m, se le observa hacia la cima de la unidad una fractura concoidal en la mayoría de los afloramientos, lo que la hace muy deleznable. En algunos reportes se menciona que esta unidad presenta un espesor de 500 a 1,600 m.

Se considera como característico en zonas de antefosa en mar abierto, con intercalaciones de flujos turbidíticos provenientes de las áreas de plataforma que evolucionan al final del Maastrichtiano, a brechas calcáreas de talud en las cercanías con el borde de la plataforma; formada en condiciones oxidantes y soluciones de bario, probablemente durante la desecación de lagos salados, esto da como resultado margas o calizas arcillosas recristalizadas.

TERCIARIO

FORMACIÓN MIDWAY, (Lutita - Arenisca)

Los afloramientos de esta unidad son poco extensos, observándoseles al noreste del poblado de Linares, N. L., en las inmediaciones de las rancherías de San Jacinto, Mederos, La Paloma y el Porvenir.

Se encuentra constituida por una secuencia rítmica de lutitas y areniscas calcáreas de color gris verdoso a amarillento con coquinas, en estratos que oscilan entre los 0.20 a 0.40 m de espesor; contiene fósiles como gasterópodos, lamelibranquios diminutos, equinodermos y ostreas, con nódulos de areniscas; algunos macrofósiles y nódulos o concreciones ornamentadas en su superficie por retículas rellenas de calcita de color café oscura. En la parte media predominan lutitas, con espesores de 1.5 a 3.0 m, con microfósiles diseminados en ellas y en las areniscas; estas últimas, presentan lentes de coquinas con menor frecuencia. Las areniscas son deleznales, con algunos ignofósiles bien impresos. La parte superior de esta unidad presenta lutitas y areniscas de color gris con tonalidades blancas de estratos de 0.5 a 1.0 m, presenta estructuras en boudinage.



Los fósiles se encuentran en lentes, pero más grandes y acercándose hacia su contacto superior con la Formación Wilcox, la secuencia litológica se hace más rítmica y delgada, con capas de 10 a 30 cm.

Por sus características litológicas esta unidad se depositó en un medio ambiente que varía de litoral (por la presencia de macrofósiles y ostras) a nerítico, profundizando hacia el oriente.

FORMACIÓN WILCOX, (Arenisca - Lutita)

Esta formación se expone ampliamente en la Cuenca de Burgos. La litología la constituyen areniscas arcillosas de color rojizo con abundantes micas, presentando una coloración gris a café amarillento, de grano medio y sumamente compactas; de estratificación delgada a media, variando a una arenisca limolítica de color marrón, que en ocasiones se le observan estructuras primarias como huellas de oleaje y galerías de gusanos y concreciones limolíticas y silicosas, interestratificadas con lutita arenosa de color gris a gris verdoso con esporádicas concreciones calcáreas, con algunos horizontes de yesos, ocasionalmente se encuentra caliza arrecifal.

Esta roca al intemperismo da un aspecto lajoso, es común en esta unidad encontrar impresiones de conchas, bivalvos y gasterópodos mal conservados, el espesor observado en la carta es de varias decenas de metros.

FORMACIÓN REYNOSA, (Conglomerado Polimítico)

La litología está constituida por conglomerados, areniscas conglomeráticas y gravas, donde la granulometría de los clastos varía de milímetros a varios centímetros, presentan mala clasificación, cementados por una matriz arcillo-calcárea, mostrando en ocasiones estratificación cruzada, los fragmentos que lo componen son de caliza, pedernal, cuarzo,



arenisca, roca volcánica y esporádicos fósiles de bivalvos y moluscos re TRABAJADOS, en general su redondez varía de subangular a bien redondeados; incluye capas de caliche. Su grosor es variable, encontrándose desde menos de un metro hasta paquetes de más de 20 m.

Se le ha interpretado como un depósito de medio ambiente continental, ayudado por agentes erosivos y transportados por corrientes fluviales de las partes altas a las más bajas, donde se fueron acumulando y actualmente forman mesetas.

Se encuentran cubriendo discordantemente a las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez del Cretácico superior, así como a la mayor parte de las unidades terciarias de las Cuencas de Burgos.

CUATERNARIO

Aluvión, Coluvión y Depósitos de Talud

Unidad representada por clastos de diferente granulometría, desde unos cuantos milímetros hasta cantos de 20 cm, se encuentra distribuida en las márgenes de los arroyos y en las partes planas en donde existen tierras de cultivo y son producto de la desintegración de las rocas preexistentes, formado principalmente por calizas y en menor proporción por rocas ígneas.

Esta unidad se presenta a todo lo largo del trazo del gasoducto. Es la más importante en cuanto a que el gasoducto será desplantado principalmente sobre esta unidad.



SPREAD 2 Y 3, del km. 177+000 al 309+000

PALEOZOICO

FORMACIÓN ESQUISTO ARAMBERRI, (Esquisto-Cuarcita)

Se define como una roca compacta de color gris con tonalidades verde que presenta un metamorfismo de bajo grado, al parecer facies de esquistos verdes, textura granoblástica en la cual el protolito se infiere de rocas pelíticas, se le observa esquistosidad penetrativa y se pueden inferir al menos dos fases de deformación.

Su espesor se desconoce al no aflorar su base, y sus afloramientos están expuestos en decenas de metros. Se considera como el basamento de la región y sobre él le sobreyace discordantemente sedimentos correspondientes a las formaciones Huizachal, Olvido, Zuloaga y por un conglomerado polimíctico del Terciario. Esta unidad se correlaciona con el Esquisto Granjeno del área de Ciudad Victoria. Se le ha propuesto un origen relacionado a un antiguo arco insular, con corteza oceánica, considerando la constitución de la secuencia metamórfica. Por su edad se ha visto afectada por varias deformaciones tectónicas que la deformaron, plegaron, fracturaron y fallaron.

JURÁSICO

FORMACIÓN LA JOYA, (Conglomerado-Arenisca)

Consiste de una alternancia de arenisca y limonita, de color rojizo a naranja, con tintes café ocre, así como un nivel conglomerático bien consolidado y gradado, constituido por fragmentos subangulosos a subredondeados de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas cementados con carbonato de calcio y material areno arcilloso, el cual ocasionalmente se encuentra totalmente incoherente y de espesor variable, desde algunos centímetros hasta 20 m. Se le considera de edad posterior al Esquisto Aramberri, pre Oxfordiano y que puede corresponder a un suelo residual del Jurásico Medio.



FORMACIÓN NOVILLO, (Caliza-Dolomía)

Consistente en caliza color gris oscuro de grano fino de textura wackestone, estratificación mediana a gruesa, con presencia de huellas de disolución, bioturbaciones y líneas estilolíticas, así como nódulos y lentes de pedernal de color café anaranjado a negro, la cual alterna con horizontes de dolomías de color gris oscuro a negro en roca fresca, intemperizando a gris claro, textura mudstone, en estratos medianos a gruesos. Se considera su edad Oxfordiana.

FORMACIÓN OLVIDO, (Yeso – Dolomía)

Está constituida por una secuencia de dolomías, calizas dolomitizadas, yesos y anhidritas; las calizas y dolomías son de color gris oscuro, textura wackestone a grainstone, los estratos varían de 0.40 a 1.5 m y mayormente son masivos, presenta líneas estilolíticas paralelas a la estratificación, por su parte los yesos y anhidritas son de color blanco con tonalidades grisáceas, en los alrededores del poblado de Aramberri, se observan capas intercaladas de yesos y anhidritas que van de 0.30 a 0.80 m de potencia. El espesor de la unidad es variable, considerándosele de 50 a 100m.

FORMACIÓN LA CASITA, (Lutita – Arenisca)

Imlay (1943; in CRM, 2004) la define como una secuencia de areniscas, lutitas, margas, calizas, carbón, yesos y algunos conglomerados. La localidad tipo se encuentra en el cañón La Casita, aproximadamente a 50 km al sur de Saltillo, Coah. Se encuentra expuesta en los cortes de la carretera Linares-Iturbide y en el anticlinal Huizachal – Peregrina, mayormente constituye el núcleo de estructuras anticlinales.



Hacia la base de esta unidad, se observan estratos delgados de margas de color gris a café oscuro, con intercalaciones breves de horizontes delgados de arenisca calcárea y esporádicamente de lutitas y calizas, en la parte media se incrementan los horizontes calcáreos arenosos intercalados con limolitas, se continúan los estratos de lutita ocasionalmente, y hacia la cima prevalecen las lutitas y limolitas calcáreas de color violáceo oscuro, llegándose a presentar estratos delgados de caliza arcillosa. Su estratificación es de delgada a mediana, presentando concreciones calcáreas, algunas de las cuales en su interior llegan a presentar amonitas y en algunos horizontes se presenta pirita singenética y es posible observar en algunas localidades lentes de carbón. Su espesor es variable, estimándose de 20 a 80 m, sin embargo se han llegado a reportar hasta 100 m en el cañón de Huizachal.

CRETÁCICO

FORMACIÓN TARAISES, (Caliza – Lutita)

Imlay (1936; in CRM, 2004) la define en el cañón de Taraises (sierra de Parras, Coah.), como un paquete de 143m de “calizas de estratificación delgada y calizas arcillosas nodulares en la parte superior y calizas de color gris hacia la base”. Forma parte de la Sierra Madre Oriental, aflora en forma de delgadas franjas, siendo posible observar buenos afloramientos en las inmediaciones de Iturbide, N.L., generalmente constituye los flancos de estructuras anticlinales.

Esta unidad, hacia su base, está constituida por calizas arcillosas de color gris claro a oscuro, con tonalidades rosáceas, de estratificación delgada a mediana, con intercalaciones de lutitas y limolitas de color gris con tonalidades amarillentas por intemperismo, en la parte media consiste de una alternancia de calizas microcristalinas de textura mudstone y wackestone con intercalaciones de calizas arcillosas y limolitas el espesor de las capas de caliza se incrementa hasta 0.80 m y hacia la parte superior la estratificación vuelve a ser delgada con espesores de 0.20 a 0.40 m. Es posible observar



además, de manera informal en la secuencia algunas delgadas bandas de pedernal negro hacia su cima, su espesor se llega a observar de 25 a 210 m.

Estudios petrográficos reportan una caliza microcristalina aloquímica y espática recrystalizada, su medio ambiente de depósito se considera infranerítico, con algunas irregularidades topográficas.

FORMACIÓN TAMAULIPAS INFERIOR, (Caliza-Dolomía)

Fue definida por Stephenson (1921; in CRM, 2004), para definir a los sedimentos del Cretácico que afloran en la Sierra de Tamaulipas, sin referirse a una localidad específica. Consiste de calizas criptocristalinas de color crema con líneas estilolíticas paralelas a los planos de estratificación y nódulos de pedernal gris claro.

Aflora en el anticlinal Huizachal – Peregrina, donde se observa como una caliza de estratificación gruesa a masiva de color gris claro, textura packstone a wackestone, estilolitas paralelas a los planos de estratificación, nódulos y lentes de pedernal de color gris y blanquecino, en partes es algo arcillosa y presenta intercalaciones de lutitas de coloración gris oscura, observándose laminación en dichos horizontes.

FORMACIÓN CUPIDO, KhapCz (Caliza)

Unidad definida por una secuencia calcárea constituida por calizas de color gris crema rosada, de textura mudstone a wackestone, con estratificación media a gruesa, de 0.60 a 1.60 m. Su localidad tipo se localiza en el cañón del Mimbres en la porción media de la Sierra de Parras, Coah. Aflora ampliamente en la Sierra Madre Oriental, porción; existen numerosos afloramientos, como el que se observa al poniente de Linares N.L., en el frente de cabalgadura que pone en contacto con La Formación Méndez.



Se constituye por una caliza de estratificación media a gruesa, de 0.30 a 1.50 m de espesor; presenta textura mudstone a wackestone, con algunos fósiles, como foraminíferos y pelecípodos, de color gris crema a rosa, al intemperismo es gris rojizo. Presenta nódulos y lentes de pedernal blanquecino y grisáceo, tiene superficie rugosa debido a su carácter kárstico y líneas estilolíticas. Su parte media está representada por calizas ligeramente arcillosas, con algunos horizontes de lutitas y pedernal en lentes alargados, textura wackestone, de color gris oscuro a gris rojizo que intemperizan a gris blanquizo. La parte superior lo constituye una caliza de color gris oscuro con textura packstone, algo sacaroide con algunos horizontes de caliza laminares y arcillosas en su contacto con la Formación La Peña.

FORMACIÓN LA PEÑA, (Caliza – Lutita)

Imlay (1936; in CRM, 2004) fue quien propuso el término de Formación La Peña para distinguir a dos miembros; el inferior constituido por caliza y el superior por lutita y caliza, que se encuentran entre las formaciones Cupido y Aurora. Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la sierra de Taraises, 4.8 km al sureste de la hacienda La Peña, en la parte sur del estado de Coahuila.

Aflora ampliamente en la Sierra Madre Oriental, teniéndose buenas exposiciones de la misma en los cortes de la carretera Linares-Iturbide, principalmente en el sitio conocido como los Altares y en las inmediaciones de los poblados de Aramberri y La Joya.

Se presenta como una secuencia de calizas arcillosas y lutitas de color gris oscuro a gris claro y al intemperismo a gris amarillento y pardo rojizo a rosa, con escasos nódulos y lentes de pedernal; hacia su base presenta lutitas arenosas con fósiles hematizados como amonites.



Su espesor en la carta varía de unos cuantos metros hasta 40m. Se le asigna edad Aptiano para esta unidad. Se le correlaciona con el Horizonte Otates de la Sierra de Tamaulipas. El ambiente de depósito se considera de aguas profundas con aporte de terrígenos.

FORMACIÓN AURORA, (Caliza-Dolomía)

Se define como una secuencia de calizas en la sierra de Cuchillo Parado al noreste de Chihuahua; más tarde se propuso el mismo nombre para todas las rocas calcáreas del noreste de México, que se encuentran entre las formaciones La Peña y los equivalentes del grupo Washita.

Se encuentra ampliamente expuesta en la Sierra Madre Oriental, uno de los mejores afloramientos se tiene al suroeste de la sierra La Ascensión (Cerro Hijo), donde es posible reconocer sus características de plataforma, con abundante fauna entre las que se observan restos de corales, otros afloramientos son fácilmente reconocibles en los cortes de la carretera Linares-Galeana.

La caliza presenta color gris con tono rosa claro al intemperismo y al fresco un color gris claro con tono café, se observan texturas que varían de mudstone a wackestone; en algunas localidades la estratificación es mediana, presentando en general estratos con espesores de 0.40 a 1.50m y masivos; es común encontrar estructuras estilolíticas paralelas a las capas y ocasionalmente marcas de carga y nódulos de pedernal color blanco y grisáceo, en algunos casos se distinguen estructuras tipo boudinage. Los estratos se intercalan con lutitas margosas en disposición laminar con espesores de 5cm, la roca en general presenta fracturas perpendiculares a la capa, rellenas de calcita, en algunos sitios, se le observa pirita diseminada y esporádicamente se tienen concreciones pequeñas de fierro, así como macrofauna de rudistas y de miliólidos, así como fragmentos de algas y restos de coral, su espesor es variable, pudiendo ser de 200 a



250m. Las rocas de esta formación se depositaron en medios ambiente de plataforma y aguas profundas.

FORMACIÓN TAMAULIPAS SUPERIOR, (Caliza)

Fue definida por Stephenson (1921; in CRM, 2004) para a una secuencia carbonatada que se encuentra aflorando en la sierra de Tamaulipas, representada por calizas criptocristalinas de color crema a gris con nódulos de pedernal gris claro. Aflora en el anticlinal Huizachal–Peregrina como caliza color gris oscuro y amarillo al intemperismo, textura wackestone a packestone, con estratos hasta de 0.30 m, algunos intercalados con calcilitas laminares de 1.0 a 2.0 cm de espesor. Esta unidad tiene edad de Albiano-Cenomaniano. Tiene un ambiente de depósito de plataforma externa a talud interno en una zona relativamente libre de corrientes fuertes.

FORMACIÓN INDIDURA, (Caliza-Lutita)

En la Sierra de Parras, Coahuila, se describe cinco miembros de la Formación Indidura que son transicionales entre sí. Hacia la base de la unidad, el miembro 1, consiste en capas de yeso, que cubren a su vez a la Formación Cuesta del Cura; el miembro 2, consiste enteramente de lutita deleznable, fisil, fácil de erosionar y genera pronunciadas depresiones topográficas; el tercer miembro es una alternancia de lutita y arenisca, el cuarto, consiste de lutita y pocas capas de caliza negra, mientras que el quinto miembro se compone de caliza arcillosa de estratificación delgada.

La base de la Formación Indidura en los afloramientos de la Sierra de Parras, Coahuila, consiste de lutita color púrpura y la cima es de caliza arenosa con marcas de oleaje; la parte superior de la formación contiene capas gruesas de caliza negra masiva y de gran resistencia.



En general consiste en una alternancia de lutita y caliza tipo mudstone a wackestone en partes arcillosos, en capas de espesor delgado a medio, con algunas intercalaciones de arenisca.

En la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, Barboza-Gudiño et al., (2004) describen que la Formación Indidura se compone de caliza arcillosa y lutita de color gris a pardo con tonalidades rojo violáceo y amarillo verdoso en superficies intemperizadas, las capas de caliza varían de gruesas en la base y hacia la cima se constituye una secuencia rítmica de capas de caliza y arcillas con horizontes terrígenos y materiales probablemente volcániclasticos de color café, gris claro, blanco, amarillo y rojo con abundantes fósiles.

FORMACIÓN CARACOL, (Arenisca-Lutita)

Fue descrita por Imlay (1936), en el arroyo del Caracol, en la Sierra de San Ángel, al oriente de la sierra de Parras, Estado de Coahuila. Se conoce como una alternancia de arenisca, color amarillento en muestra meteorizada y de color pardo ocre en muestra fresca, de 3 a 20 cm, con granos redondeados de feldespatos y abundante muscovita en una matriz calcárea, intercalados con capas de lutita de color gris oscuro en muestra fresca y amarillo meteorizada, en capas que varían desde 3 a 30 cm.

Por definición y por contactos vistos, se deduce que esta formación descansa directamente sobre la formación Indidura, siendo su contacto transicional; sobre esta roca solo descansa discordantemente el conglomerado Charcas. Se le asigna una edad de Coniaciano-Maestrichtiano, de acuerdo a Carrillo-Bravo (1971), gracias a la presencia de *Inoceramus*, en correspondencia a la transición de esta formación hacia la Formación Indidura.



FORMACIÓN MÉNDEZ, (Lutita-Marga)

Consiste de una secuencia de lutitas calcáreas, fisiles, de color verde amarillento, deleznales y ligeramente caolinizadas; presentan esquistosidad de fractura, que con el intemperismo se disgrega en forma de punta de lápiz, con intercalaciones de margas, limolitas, calizas, areniscas y delgadas capas de bentonita, su estratificación varía de laminar a mediana y llega a tener un espesor de 0.40 m, se le observa hacia la cima de la unidad una fractura concoidal en la mayoría de los afloramientos, lo que la hace muy deleznable. En algunos reportes se menciona que esta unidad presenta un espesor de 500 a 1,600 m. Se correlaciona con la Formación Cárdenas, el Grupo Difunta de la cuenca de Parras.

CUATERNARIO

ALUVIÓN, COLUVIÓN Y DEPÓSITOS DE TALUD

Unidad representada por clastos de diferente granulometría, desde unos cuantos milímetros hasta cantos de 20 cm, se encuentra distribuida en los márgenes de los arroyos y en las partes planas en donde existen tierras de cultivo y son producto de la desintegración de las rocas pre-existentes, formado principalmente por calizas y en menor proporción por rocas ígneas.

Esta unidad se presenta a todo lo largo del trazo del gasoducto. Es la más importante debido a que el gasoducto será desplantado principalmente sobre esta unidad.



SPREAD 4, del Km. 309+000 al 451+565

CRETÁCICO

FORMACIÓN TAMAULIPAS SUPERIOR, (Caliza)

Fue definida por Stephenson (1921; in CRM, 2004) para a una secuencia carbonatada que se encuentra aflorando en la sierra de Tamaulipas, representada por calizas criptocristalinas de color crema a gris con nódulos de pedernal gris claro.

Aflora en el anticlinal Huizachal–Peregrina como caliza color gris oscuro y amarillo al intemperismo, textura wackestone a packestone, con estratos hasta de 0.30 m, algunos intercalados con calcilitas laminares de 1.0 a 2.0 cm de espesor. Esta unidad tiene edad de Albiano-Cenomaniano. Tiene un ambiente de depósito de plataforma externa a talud interno en una zona relativamente libre de corrientes fuertes.

FORMACIÓN EL ABRA, (Caliza)

Esta unidad consiste de caliza arrecifal, con abundante contenido fosilífero; se presenta en estratos gruesos de 1 a 5 m de espesor o masiva; es de color gris amarillento claro, constituida principalmente por un conjunto de bancos arrecifales fosilíferos, separados por calcarenita y clásticos biogénicos; el cementante entre los fragmentos fosilíferos, es generalmente calcita de grano fino. Se han reportado espesores de entre 50 hasta 2000 m.

La caliza es pura y compacta, llega a formar escarpes y cantiles casi verticales y presentar carsticidad. Por contenido fosilífero (foraminíferos) ha sido generalmente incluida dentro de un rango entre el Albiano-Cenomaniano. Se encuentra ampliamente distribuida sobre el elemento paleogeográfico conocido como Plataforma San Luis



Valles, que cubre ampliamente la zona centro del estado de San Luis Potosí, extremo sur de Nuevo León y suroeste de Tamaulipas.

La Formación El Abra subyace discordantemente las formaciones Agua Nueva o San Felipe, Méndez o Tamasopo. Su contacto inferior no suele ser visible, aunque se presume descansa concordantemente sobre la Formación Guaxcamá y la Arenisca Alamitos, del Cretácico Inferior. Se interdigita lateralmente con las facies de cuenca de las formaciones Indidura y Cuesta del Cura.

TERCIARIO

SEDIMENTOS LACUSTRES, (Travertino, Yeso)

Depósito de secuencia de sedimentos lacustres evaporíticos, que consisten en horizontes de caliza de color café de estratificación gruesa, y de yeso color crema a blanco, semicristalino, muy fino (fibroso); también está constituido por sedimentos arcillo arenosos con minerales de yeso y calcita.

CUATERNARIO

ALUVIÓN, COLUVIÓN Y DEPÓSITOS DE TALUD

Unidad representada por clastos de diferente granulometría, desde unos cuantos milímetros hasta cantos de 20 cm, se encuentra distribuida en las márgenes de los arroyos y en las partes planas en donde existen tierras de cultivo y son producto de la desintegración de las rocas preexistentes, formado principalmente por calizas y en menor proporción por rocas ígneas. Ésta unidad se presenta a todo lo largo del trazo del gasoducto; por lo que resulta ser la más importante debido a que el gasoducto será desplantado en su gran mayoría sobre esta unidad.



CAPITULO IV TRABAJOS DE EXPLORACIÓN

IV.1 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO SUPERFICIAL

El reconocimiento e interpretación de las condiciones geológicas que se presentan en el trayecto donde se emplazará el proyecto, así como su integración en el diseño y construcción, con soluciones acordes a las características del terreno y el medio ambiente que le rodea; es el objetivo primordial de la investigación y análisis geológico a lo largo del trazo del gasoducto. De esta manera el estudio geológico permitió caracterizar las diferentes zonas que se encuentran en el entorno de influencia al eje del proyecto; como son los tipos de litología, estructuras morfológicas y geológicas con las que se determinan las zonas inestables o de debilidad, etcétera; conocimiento que nos permite prever las condiciones a las que se enfrentarán durante la construcción de esta obra.

Una de las tareas más importantes en la fase de estudios, es precisamente el reconocimiento geológico superficial; el cual nos permitirá conocer in situ las características detalladas para la construcción del ducto, realizando una serie de observaciones y mediciones directas, que junto con la programación de otros métodos de exploración, permitirán determinar las condiciones geotécnicas, así como los riesgos geológicos, con los que se define la condición geomecánica a lo largo del trayecto del gasoducto y que pudieran afectar los tiempos y costos de construcción, su funcionalidad e incluso la vida útil de la misma.

El levantamiento geológico se realizó para una franja de estudio de 250 m a cada lado del eje del trazo. Durante el recorrido se delimitaron los contactos litológicos, realizándose observaciones que corresponden a las zonas superficiales existentes,



indicando la composición de los materiales y su respectiva clasificación, especificando el tipo de suelo y/o roca detectada.

En el caso donde se detectaron afloramientos de roca, se indicó su clasificación, grado de alteración, así como las características geotécnicas derivadas de los estudios de exploración. Las observaciones obtenidas correspondiente a la Sierra Madre Oriental, formaron parte de la evaluación realizada para determinar la estabilidad de los taludes, aunque es necesario mencionar que el tramo donde se ubicará el gasoducto, se caracteriza por mostrar macizos rocosos con estructuras con deterioro tal que general dificultaron la toma de datos estructurales; por lo que este concepto en general se realizó apreciando el entorno global de los macizos rocosos del lugar.

Finalmente la información obtenida en campo, se procesó y vertió en planta y secciones estratigráficas, representando en éstas, los contactos y unidades litológicas, rasgos estructurales importantes tales como: fallas, fracturas y zonas potencialmente inestables.

IV.2 POZOS A CIELO ABIERTO

El método de exploración denominado pozo a cielo abierto (PCA) es de tipo superficial y consiste en realizar una excavación por medios manuales (pico y pala), o por medios mecánicos (retroexcavadora), cuyas dimensiones aproximadas son de 2.0 m de ancho por 2.5 m de largo y 3.0 m de profundidad.

El objetivo de la exploración mediante PCA's, es reconocer las características estratigráficas superficiales de trazo del ducto, mediante la obtención de muestras de tipo alterado e inalterado. El muestreo alterado consiste en la recolección de aproximadamente 60 kg de suelo de cada uno de los estratos detectados dentro del pozo para obtener parámetros de calidad del material y definir su posible utilización en la construcción de rellenos estructurales de la zanja y/o terracerías; mientras que las



muestras inalteradas se refiere a la extracción de un cubo de suelo de 30 cms por lado, labrado y extraído de las paredes del pozo, la muestra es protegida con manta de cielo con parafina, de tal forma que conserve la humedad natural del suelo, de los diferentes ensayos de laboratorio, se pueden conocer las características mecánicas del suelo explorado.

En cada uno de los pozos a cielo abierto se efectuaron además, la medición y/o detección de nivel freático y la medición de la resistividad térmica, la cual define los niveles máximos de resistencia a la transmisión de calor que ofrecen las capas superficiales del terreno.

IV.3 SONDEOS POR MEDIO DE BARRILES MUESTREADORES

Las perforaciones en roca se realizaron a una profundidad tal, que se obtuviera un muestreo continuo de roca sana de mínimo 3.0 m de longitud, la cual se obtuvo, en algunos puntos de manera superficial, en los que existía un afloramiento de roca sana, y hasta los 10.0 en zonas con presencia de roca con alto grado de intemperismo. Con la información obtenida de la prueba se logró calcular el índice de calidad de la roca (% RQD), existente en la zona donde se alojara el ducto.

Es importante mencionar que en zonas donde superficialmente están compuestas por suelo, se empleó el método de penetración estándar (SPT), obteniéndose muestras de tipo alterado mediante el muestreador de tubo partido, obteniéndose el valor N_{spt} de la prueba, así mismo, se realizó la recuperación de muestras inalteradas por medio de tubos de pared delgada en forma selectiva, un vez conocida la resistencia del subsuelo.



Para los trabajos de perforación en campo se utilizó un equipo ligero marca Voyager (ver imagen IV.1), que opera mediante el sistema de perforación rotatorio, con recuperación de núcleos, utilizando el barril doble giratorio ($\Phi=45.72$ mm), cortando y recuperando muestras cilíndricas de 36.06 mm de diámetro.



Imagen IV.1 Equipo utilizado para la ejecución de sondeos rotatorios

IV.4 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Este tipo de estudios se realiza para proyectar de manera óptima un sistema de red de tierras físicas de los sistemas de protección catódica que permita descargar al subsuelo las corrientes eléctricas generadas, así como las corrientes telúricas procedentes de los fenómenos atmosféricos, tales como tormentas y lluvias eléctricas, permitiendo con esto la protección al personal operario y al equipo instalado.

Este estudio se realiza también con la finalidad de conocer el potencial corrosivo del suelo que pudiera afectar las estructuras metálicas subterráneas con las que se encuentre en contacto.



Los sondeos eléctricos verticales, se realizaron en el área destinada a la construcción de las Estaciones de Compresion I y II, en los kilómetros 142+936 y 260+575 respectivamente. La configuración geométrica de los sondeos utilizada, fue el arreglo tetraelectródico tipo Wenner, conforme a lo indicado en la norma ASTM G57 “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method”. Los resultados se presentan a continuación:

ESTACIÓN DE COMPRESION I

En el 142+936, se realizó el sondeo eléctrico vertical N° 1 para el diseño de tierras físicas del proyecto, y conocer el grado de corrosión que ejercerá el suelo a las instalaciones particulares de la estación. A continuación, se muestran los datos de campo y la interpretación gráfica del sondeo.

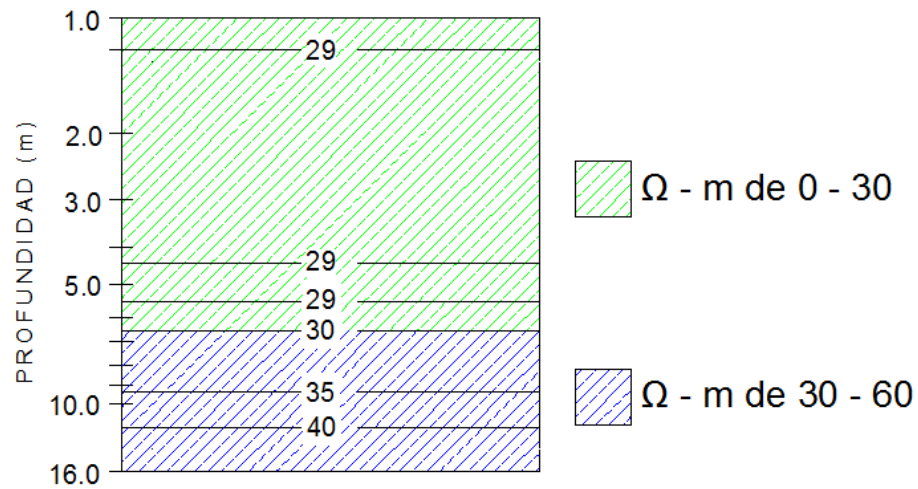
SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS A (m)	HINCADO DE ELECTRODOS B (m)	RELACIÓN A/B	VALORES DE RESISTENCIA Ω	RESISTIVIDAD NATURAL Ω - m
1.0	0.16	6.25	4.41	28.95
2.0	0.27	7.41	2.28	29.5
3.0	0.27	11.11	1.55	29.7
5.0	0.27	18.52	0.91	28.8
6.0	0.27	22.22	0.77	29.2
8.0	0.27	29.63	0.65	32.9
10.0	0.27	37.04	0.57	36.1
16.0	0.27	59.26	0.51	51.3
PROMEDIO GENERAL CORREGIDO:			1.46	33.28

Tabla IV.1 Resultados promedio de Sondeo Eléctrico Vertical N° 1

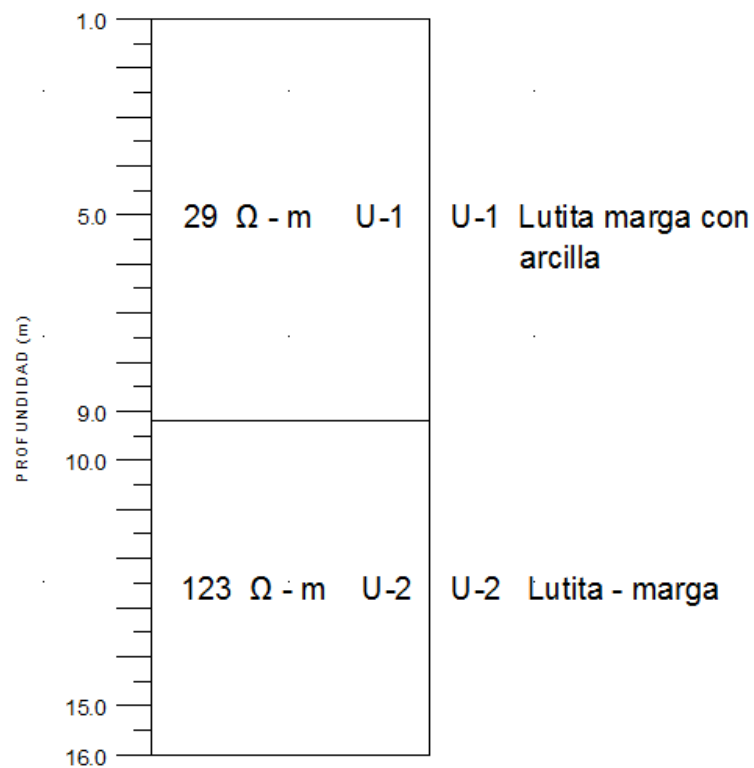
Graficando los valores de resistividad, obtenemos un corte de resistividad aparente, para finalizar con el corte de resistividad real del suelo.



CAPITULO IV. TRABAJOS DE EXPLORACION



Gráfica IV.1 Corte de resistividad aparente



Gráfica IV.2 Corte de resistividad real



ESTACIÓN DE COMPRESION II

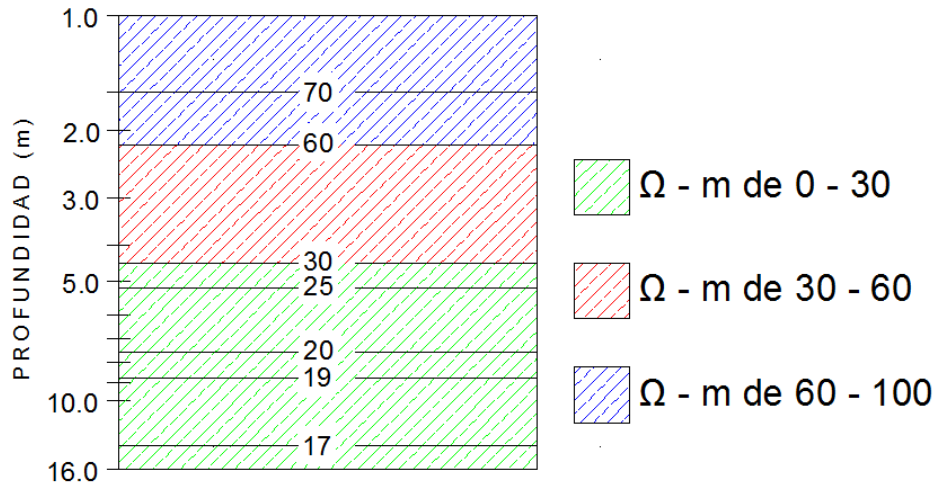
La Estación de Compresion II, se ubica en el kilómetro 260+575 de la línea del gasoducto; lugar donde se realizó el sondeo eléctrico vertical N° 2, teniendo como objetivo principal, recolectar los datos de campo necesarios para el diseño de la red de tierras físicas y medir el grado de corrosividad del suelo.

Los datos de campo de la prueba, se presentan a continuación.

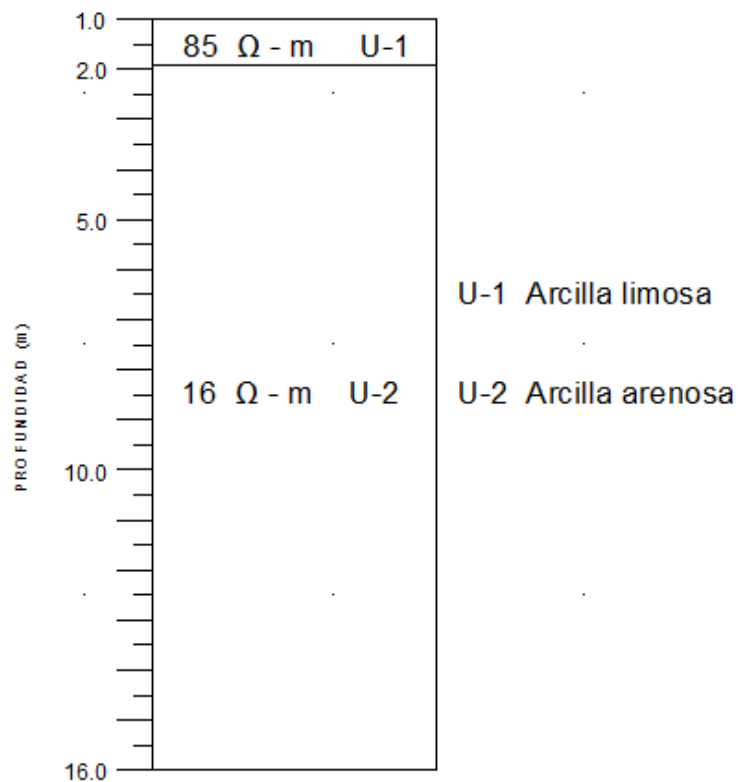
SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS A (m)	HINCADO DE ELECTRODOS B (m)	RELACIÓN A/B	VALORES DE RESISTENCIA Ω	RESISTIVIDAD NATURAL $\Omega - m$
1.0	0.16	6.25	11.87	77.8
2.0	0.27	7.41	5.02	65.1
3.0	0.27	11.11	2.58	49.4
5.0	0.27	18.52	0.79	25.2
6.0	0.27	22.22	0.58	22.0
8.0	0.27	29.63	0.39	19.6
10.0	0.27	37.04	0.29	18.2
16.0	0.27	59.26	0.16	16.6
PROMEDIO GENERAL CORREGIDO:			2.71	36.74

Tabla IV.2 Resultados promedio de Sondeo Eléctrico Vertical N° 2

Graficando los valores de resistividad, obtenemos un corte de resistividad aparente, para finalizar con el corte de resistividad real del suelo.



Grafica IV.3 Corte de resistividad aparente



Grafica IV.4 Corte de resistividad real



Para el caso de las correcciones por temperatura y humedad de sitio, se tomaron las temperaturas ambientales al inicio y fin de cada SEV, además de la temperatura del suelo a una profundidad de 50 cm mediante la excavación de un pozo a cielo abierto, se tomó una muestra del suelo para medir el contenido de humedad y se realizó la corrección efectuando una comparativa con la gráfica del efecto del contenido de humedad en la resistividad del suelo. La medición del contenido de humedad se realizó en época de sequía, ya que es cuando se presentan las condiciones más desfavorables del suelo.

IV.5 TENDIDOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Como parte de los trabajos de campo, en la zona donde se proyectó la construcción de las Estaciones de Compresion I y II, se realizó una serie de levantamientos geofísicos por medio de Tendidos de Refracción Sísmica (TRS), con la finalidad de construir un perfil sismoestratigráfico con longitud total de 300 m para alcanzar una profundidad promedio de análisis de 40 m aproximadamente, suficiente para caracterizar el comportamiento dinámico del subsuelo.

El objetivo de esta prueba es la de obtener las velocidades de onda para determinar, por medio de un estudio posterior, la magnitud del coeficiente sísmico puntual de cada zona. Esta prueba se realizó bajo lo indicado en la Norma ASTM-D5777, utilizando en campo un sismógrafo digital de 12 canales para almacenar los datos obtenidos de las pruebas; el proceso de la información se realizó en gabinete para determinar las velocidades de ondas V_p y V_s , y con estos datos, determinar los módulos elasto dinámicos de los estratos que constituyen la estratigrafía de la zona. Los resultados se presentan a continuación:



ESTACIÓN DE COMPRESION I

TRS	Unidad	Velocidades de Onda		Peso Vol. (t/m ³)	Relación de Poisson	Módulos Dinámicos	
		Vp (m/s)	Vs (m/s)			E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)
1	1	1112.0	573.0	1.85	0.319	6,191.7	16,336.8
	2	2796.0	1392.0	2.20	0.335	43,454.2	116,042.9
	3	4219.0	2315.0	2.20	0.285	120,186.5	308,785.5
2	1	1347.0	720.0	1.85	0.300	9,776.1	25,418.0
	2	2652.0	1271.0	2.20	0.351	36,228.0	97,881.6
	3	4252.0	2345.0	2.20	0.281	123,321.7	316,060.1
3	1	1080.0	511.0	1.85	0.356	4,924.3	13,352.5
	2	2537.0	1130.0	2.20	0.376	28,635.9	78,820.6
	3	4002.0	2197.0	2.20	0.284	108,246.5	278,043.9

Tabla IV.3 Propiedades dinámicas obtenidas, Estación de Compresion I

Las unidades generalizadas detectadas con esta metodología se describen a continuación.

Unidad 1. Se identifica como una roca Lutita con ligera alteración y fracturamiento. Se considera una material de muy mala calidad. Presenta velocidades de propagación de onda longitudinal que varían de 1080.0 a 1347.0 m/s, con espesor ubicado entre 1.0 y 10.0 m. Se considera un material poco compacto y 100% arable.

Unidad 2. Esta unidad sismoestratigráfica se asocia con una Lutita sana, con velocidades de propagación de onda longitudinal que se ubican entre 2537.0 y 2796.0 m/s, con espesor variable que alcanza hasta los 30.0 m de profundidad máxima. Se considera una roca de regular calidad que se califica con arabilidad marginal.

Unidad 3. Esta unidad se detecta a profundidad y constituye el basamento geológico del sitio. Se conforma por una posible roca Caliza-Lutita. Se trata de una roca de excelente calidad, donde se reportan velocidades de propagación de onda longitudinal que varían entre 4,002.0 y 4,252.0 m/s. Esta unidad se considera no desgarrable con maquinaria similar a un D9R, por lo que su ataque requiere el uso de explosivos.

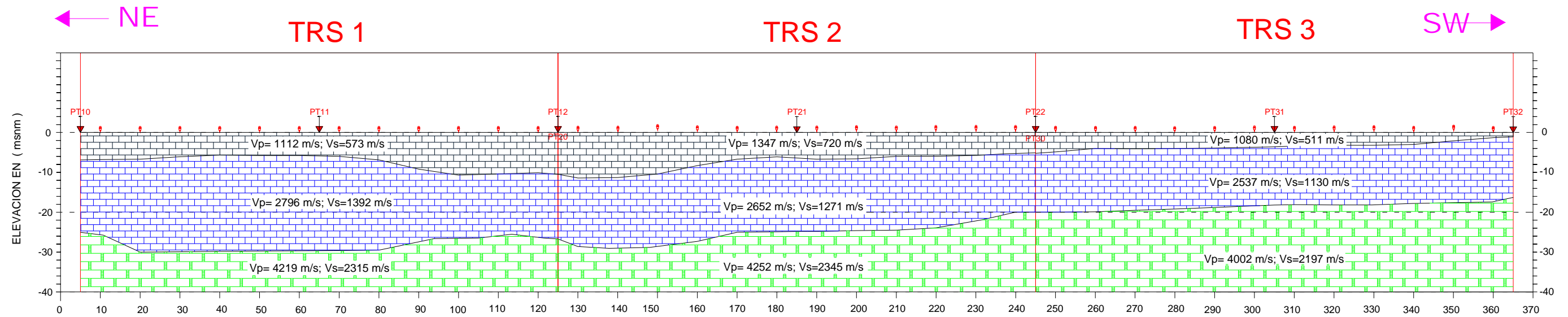


Figura IV.1 Sección Sismoestratigráfica de la Estación de Compresion I

UNIDAD GEOSISMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	CALIDAD DE MATERIAL	ARABILIDAD CON DESGARRADOR D9R
	Lutita con ligera alteración	1112	573	Roca de muy mala calidad	Desgarrable
	Lutita gris sana	2796	1392	Roca de regular calidad	Marginal
	Posible roca Caliza-Lutita	4219	2315	Roca de excelente calidad	No desgarrable

Tabla IV.4 Caracterización sísmica del TRS-01

UNIDAD GEOSISMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	CALIDAD DE MATERIAL	ARABILIDAD CON DESGARRADOR D9R
	Lutita con ligera alteración	1080	511	Roca de muy mala calidad	Desgarrable
	Lutita gris sana	2537	1130	Roca de regular calidad	Marginal
	Posible roca Caliza-Lutita	4002	2197	Roca de excelente calidad	No desgarrable

Tabla IV.5 Caracterización sísmica del TRS-03

UNIDAD GEOSISMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	CALIDAD DE MATERIAL	ARABILIDAD CON DESGARRADOR D9R
	Lutita con ligera alteración	1347	720	Roca de muy mala calidad	Desgarrable
	Lutita gris sana	2652	1271	Roca de regular calidad	Marginal
	Posible roca Caliza-Lutita	4252	2345	Roca de excelente calidad	No desgarrable

Tabla IV.6 Caracterización sísmica del TRS-02



ESTACIÓN DE COMPRESION II

TRS	Unidad	Velocidades de Onda		Peso Vol. (t/m ³)	Relación de Poisson	Módulos Dinámicos	
		Vp (m/s)	Vs (m/s)			E (kg/cm ²)	G (kg/cm ²)
1	1	707.0	195.0	1.55	0.459	600.8	1752.9
	2	1066.0	336.0	1.60	0.445	1841.3	5320.9
	3	1566.0	426.0	1.80	0.460	3329.8	9723.4
2	1	408.0	149.0	1.55	0.423	350.8	998.4
	2	805.0	291.0	1.60	0.425	1381.1	3935.8
	3	1381.0	440.0	1.80	0.444	3552.3	10255.5
3	1	429.0	170.0	1.55	0.407	456.6	1284.8
	2	986.0	290.0	1.60	0.453	1371.7	3985.1
	3	1399.0	413.0	1.80	0.452	3129.7	9090.3

Tabla IV.7 Propiedades dinámicas, Estación de Compresion II

Las unidades generalizadas detectadas con esta metodología se describen a continuación.

Unidad 1. Arcillas limosas con arena fina a gruesa. Esta unidad sismoestratigráfica presenta velocidades de propagación de onda longitudinal que varían de 408.0 a 707.0 m/s, con espesor promedio de 4.0 m. Se considera un material 100% arable.

Unidad 2. Suelo arcillo limoso con arena fina, de consistencia firme, con velocidades de propagación de onda longitudinal que varían de 805.0 a 1066.0 m/s, con espesor variable que alcanza hasta los 24.0 m de profundidad máxima, aproximadamente. Se considera 100% arable.

Unidad 3. Arcilla limosa con arena fina, con presencia de carbonato de calcio. Se consideran suelos muy firmes, donde se registraron velocidades de propagación de onda longitudinal que varían entre 1381.0 y 1556.0 m/s. Esta unidad se considera arable con maquinaria similar a un D9R.

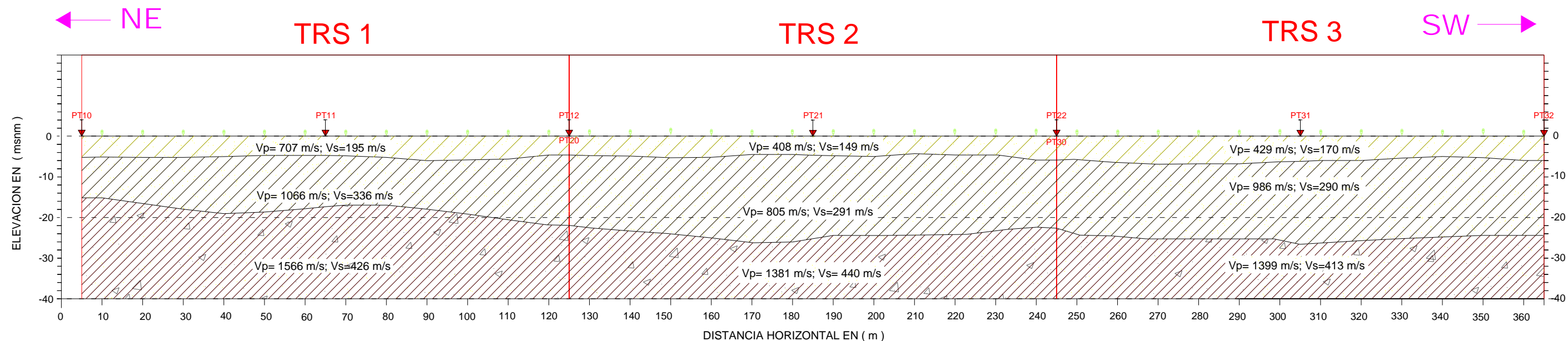


Figura IV.2 Sección Sismoestratigráfica de la Estación de Compresion II

UNIDAD GEOSÍSMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	ARABILIDAD
	Arcilla limosa con arena fina a gruesa.	707	195	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina de consistencia firme.	1066	336	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina y presencia de CaCO3.	1566	426	100 % Arable

Tabla IV.8 Caracterización sísmica del TRS-01

UNIDAD GEOSÍSMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	ARABILIDAD
	Arcilla limosa con arena fina a gruesa.	429	170	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina de consistencia firme.	986	290	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina y presencia de CaCO3.	1399	413	100 % Arable

Tabla IV.9 Caracterización sísmica del TRS-03

UNIDAD GEOSÍSMICA	POSIBLE CORRELACION GEOLOGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	ARABILIDAD CON DESGARRADOR D9R
	Arcilla limosa con arena fina a gruesa.	408	149	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina de consistencia firme.	805	291	100 % Arable
	Arcilla limosa con arena fina y presencia de CaCO3.	1381	440	100 % Arable

Tabla IV.10 Caracterización sísmica del TRS-02



CAPITULO V

INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

A partir de la información obtenida en el reconocimiento geológico y los resultados de los sondeos directos e indirectos, se logró realizar una interpretación geológica geotécnica para cada uno de los Spread que integran el trayecto, en donde se indican cambios litológicos, resistencia de los materiales, arabilidad y riesgos geológicos geotécnicos detectados. A continuación se describen los resultados obtenidos para cada Spread.

SPREAD 1

Este primer segmento que comprende del km. 0+000 al 177+000, del municipio Los Ramones a la parte baja de la Sierra Madre Oriental, presenta una topografía de llanuras y lomeríos suaves, correspondiendo en general a depósitos aluviales. Este material se encuentra con presencia predominante en todo el primer spread, aflorando únicamente algunos pequeños lomeríos de algunos conglomerados y lutitas-margosas; estos últimos materiales incrementan ligeramente su presencia en el trayecto del ducto, a medida que se acerca a la región ocupada por la Sierra Madre Oriental.

DEL KM 0+000 AL 89+750

Tramo emplazado en amplias llanuras, con algunos lomeríos redondeados, generalmente de pendientes suaves. El trazo del proyecto está compuesto por aluvión (Qal) que incluye arcilla de consistencia media a firme, empacando arenas y gravas; con colores que varían de gris a beige en tonos claros. En el cadenamiento 9+300 y hasta el 10+850, dentro de la franja de influencia al eje del proyecto, se encuentra roca lutita (KcmLu-Mg) altamente intemperizada y degradada, mostrando únicamente relictos de la roca original. Aun cuando el eje del gasoducto apenas toca este tipo de materiales, dado el



grado de alteración que presenta, muestra un comportamiento geotécnico de un suelo y prácticamente con la misma calidad que el aluvión. Verificando los valores de resistividad eléctrica obtenidos, observamos que dada la característica anisotrópica de los aluviones (irregularidad de características físicas), los datos obtenidos oscilan entre los 2 y 30 ohm-m, excepcionalmente llegando a alcanzar valores hasta de 83 ohm-m en escasos sitios donde la densidad de los materiales aluviales es ligeramente mayor. De igual manera los valores de resistencia a la compresión axial (qu) obtenidos en el laboratorio, comúnmente no fueron mayores a 25 ton/m², y solo ocasionalmente llegaron a rebasar este valor llegando a poco más de 65 ton/m²; estos últimos valores en zonas influenciadas por la cercanía a lomeríos de rocas de lutita y margas. (KcmLu Mg).

También mencionamos que en algunos casos en que el trazo se acerca a algunas lomas, encontraremos algunos materiales como coluviones (Qcl) y depósitos de talud (Qdt). Entre los sitios que presenta riesgos hidrológicos se encuentra el cruce del Río San Juan en el kilómetro 21+350; sitio donde afloran las lutitas y margas (kcm Lu Mg), y los conglomerados de edad terciario, Conglomerado Polimíctico (Tpl) y Conglomerado Reynosa (Cgp).

Las lutitas margosas no afloran sobre la zona del eje de la traza del proyecto, aun cuando los estudios de exploración eléctrica (SEV) determinan que entre los cadenamientos 11+500 a 20+750 km, la roca se encuentran a escasos 10 m de la superficie, y conforme el trazo se acerca a la región de la sierra, cada vez son más someros; de tal forma que a partir del kilómetro 36+000 y hasta el cadenamiento donde finaliza este spread 1 (cadenamiento 177+000) tanto los valores determinados por la exploración resistiva, como los obtenidos mediante la exploración sísmica de refracción, indican que esta roca se encuentra a profundidades aproximadas de 5 m; esta disposición de los materiales se presenta en los cadenamientos 36+500 a 40+500, y de 49+250 a 54+250. En estos sitios los estudios confirman el comportamiento característico de la región, observándose que los valores cercanos al contacto de la roca lutita margosa (KcmLuMg) indican que tanto



los resistivos en la eléctrica, como los de velocidad, en la sísmica; se correlacionan con roca intemperizada y alterada, mostrando valores que fácilmente se confunden con los aluviones, por lo que en estos casos se complica establecer límites precisos de contactos entre estos materiales.

También, se observa que a medida que el estudio penetra a mayor profundidad de los 12 metros, los resultados de ambos estudios, en especial de TRS, son más altos y consistentes, lo cual se interpreta como roca más sana. Esta condición, se observa a medida que el trazo se acerca a la región de la Sierra Madre Oriental.

En cuanto a los materiales en la superficie del terreno, donde se alojara el ducto, hasta el cadenamiento 73+000, consisten de un material clasificado como arcilla de consistencia media a firme, empacando arenas y gravas, con colores que varían de gris a beige en tonos claros. Exceptuando entre los km 66+500 al 68+750, y el 76+250 y el 77+500 en el que se encuentra un conglomerado (TCgp) conformado por Boleos empacados en una arcilla color café claro y grumos de CaCO_3 .

Mencionando que entre los cadenamientos 72+750 y 77+500, existe una arcilla de alta plasticidad color café claro, con fragmentos de sales cristalinas y grumos de CaCO_3 , lo cual al experimentar incrementos en el contenido de humedad puede expandirse y afectar la estabilidad del ducto.

Del km 77+500 al 81+750, se encuentra una pequeña loma en la que está presente arena arcillosa color café amarillento; material que muestra resultados de SEV y TRS con valores mayores; determinándose que la roca lutita (KcmLuMg) se encuentra subyaciendo aproximadamente a poco más de 3.0 metros, determinándose con apoyo a los bajos valores obtenidos para esta roca, la cual se encuentra intemperizada y degradada en la zona de contacto.



En el km 83+250 de la traza del ducto, se encuentra el cruce del Río Cabezones, sitio en el que en sus alrededores aflora roca lutita (Kcm LuMg) con un alto grado de alteración, clasificándose como fragmentos de roca sedimentaria empacada en una matriz de arcilla color café claro, con raíces vegetales. La obra del ducto será emplazada cortando éstos afloramientos de roca, los cuales se encuentran intercalándose en algunas zonas del trayecto, hasta el cadenamiento 89+750.

DEL KM 89+750 AL 145+250

A partir de este punto 89+750 y hasta el cadenamiento 99+250, la superficie del terreno por donde cruza el ducto está compuesta por Aluvión que contiene arcilla arenosa de color café-verdoso con fragmentos de Lutita y presencia de CaCO_3

En este sitio (99+250) el ducto deberá atravesar el Río Hualahuises, sitio que en superficie está representado por Aluvión que contiene arcilla de alta plasticidad de color negro. De acuerdo a los resultados de resistividad eléctrica, en la zona del río el espesor de aluvión incrementa hasta aproximadamente 11.0 m. También observamos que del cadenamiento 101+500 al 106+500, los valores resistivos y de sísmica de refracción arrojan valores más altos a partir de 4.0 m de profundidad, por lo que se ha deducido que la roca lutita margosa se encuentra muy somera. Aunque es conveniente mencionar que en superficie donde cruzara el proyecto, solo se observan gravas mal graduadas empacadas en arcilla de color gris-verdoso con grumos de CaCO_3 .

En el cadenamiento 103+750 que corresponde al cruce con el Río “La Cebadilla”, se encuentran escasos afloramientos de conglomerados (Cgp); para continuar, a partir del km 105+500 y hasta el 118+500 con arcilla de alta plasticidad color negra, además también en la zona cercana al cruce con el río “Pablillos” (km 107+750) el material fue clasificado como arcilla color café verdoso, con algunos fragmentos de roca sedimentaria (Kcm Lu-Mg).



Siguiendo la traza del eje, encontramos que la lutita (Kcm Lu Mg) aflora nuevamente en tramos cortos (de km 118+500 a 124+200 y de 141+750 a 145+250), aunque en muchos de los casos, el trazo no tocará la lutita, debido a que su trayectoria pasa por aluvión.

DEL KM 145+250 AL 177+000

El último tramo de este primer spread, corresponde a amplios depósitos de aluvión con tan solo algunas pequeñas ventanas de Lutitas (KcmLuMg).

Los extensos tramos de aluvión fueron clasificados identificados del tramo 145+250 al 162+000, conformados por arcilla gravosa con presencia de CaCO_3 , subyaciéndole fragmentos de lutita y en algunos casos boleos empacados en una matriz de arcilla con arena fina a media y presencia de CaCO_3 , presentando colores que van de café-verdoso a rojizo.

A partir del cadenamamiento 162+000 y hasta el 171+500 el trazo avanza por materiales de aluvión, compuestos por arcillas de alta plasticidad de color gris oscuro con presencia de arena fina; le subyacen arcillas que contienen fragmentos de roca lutita de color gris verdoso, en este subtramo las anomalías eléctricas y sísmicas representan materiales no consolidados, por lo que se interpretan como zonas con profundo contenido de aluvión, que pudiera relacionarse con alguna estructura geológica; sin embargo en superficie no se aprecia ninguna evidencia que pudiese afirmar alguna idea.

Precisamente en el cadenamamiento 165+600 el trazo del proyecto cruza el Río San Antonio, el cual está constituido por arcillas con poca arena fina, color café oscuro, sobre yaciendo a gravas finas y arena empacadas en arcilla color café claro; característica que prácticamente se conserva hasta el final del primer spread, en el cadenamamiento 177+000.



SPREAD 2

Este segundo segmento comprende del kilómetro 177+000 al 210+000, el cual cruza la Sierra Madre Oriental, presentando una topografía montañosa con medianas a fuertes elevaciones y pendientes, correspondiendo en general a macizos rocosos de edades Paleozoico, Jurásicas, Cretácicas y Cenozoicas; en el que incluso se encuentran taludes y estructuras geológicas que pueden complicar el emplazamiento del gasoducto. El tramo inicia con la parte limítrofe de la altiplanicie, para internarse a la zona de sierras dispuesta con orientación general NW-SE.

DEL KM 177+000 AL KM 210+000

Tramo emplazado en una región que muestra cambios bruscos de topografía, generalmente con pendientes medianas a fuertes, característicos de la zona de sierra. El suelo por donde se alojara el trazo del ducto está compuesto por diferentes litologías compuesto por lutitas, margas, calizas y areniscas.

Este segmento inicia con 2 kilómetros que en la superficie está compuesto por aluvión (Qal) conformado por arcillas con arena fina y gravas, de color verdoso, subyaciendo se encuentra una mezcla de arena con arcilla y grava de color gris. Este suelo se va degradando hasta encontrar arcilla de alta plasticidad con poca arena y restos de materia orgánica descompuesta. Observando los resultados resistivos y los de sísmica, deducimos que la lutita (KcmLuMg) se encuentra a unos poco menos de 10.0 m de profundidad.

Del kilómetro 178+900 al 181+800 encontramos afloramientos de lutita (KcmLuMg) intemperizada en la superficie, infiriendo que se encuentra sana a mayor profundidad.



Sobre el área de influencia, se encuentran algunos contactos litológicos (km 181+800) de la lutita (KcmLuMg), con la roca caliza (KhapCz) que le subyace; y hasta poco después del 182+000. Situación que nuevamente se presenta del 183+600 al 185+450, tramo que corresponde a caliza (KhapCzDo). Precisamente en este último segmento, la información cartográfica indica la existencia de la Cabalgadura Obregón, la cual es una falla inversa con bajo ángulo de deslizamiento, incluso es en esta parte del trayecto donde se localiza la elevación más alta del proyecto en el km 184+650.

A partir del km 186+100 del trazo del ducto, donde se encuentra expresada también la traza de la Cabalgadura Obregón; encontramos frecuentes y variados contactos litológicos; en este punto aparece la Lutita-Margosa (KhapCzDo) con valores de sísmica mayores a 845 m/seg, lo cual indica que tiene condiciones de sanidad de roca de regulares a buenas; esta roca persiste hasta el cadenamiento 186+200; punto donde encontramos materiales de pie de talud (Qdt), material en el que se emplazara el ducto, y que aparece hasta el cadenamiento 187+600.

En el km 187+600 y hasta el 188+000 aflora lutita-arenisca, de edad Jurásica, que de acuerdo a la sísmica de refracción es bastante consistente. El trazo continua por material de talud (Qtd) y Aluvión (Qal) para abrirse paso por calizas de la Formación Olvido, que contienen una facie litológica de rocas evaporíticas (yesos); estos materiales los encontraremos en los cadenamientos 188+600 al 188+700.

En el cadenamiento 190+650 y 191+050 del proyecto, se localiza la Falla Aramberri que muestra un desplazamiento lateral, afectando precisamente la intersección en los dos puntos mencionados, así como el intervalo entre ellos; ya que incluso muestra algunos sitios con problemas de estabilidad de taludes. **Se recomienda en esta sección, modificar el trazo original del proyecto.**



Del 191+900 al 210+000 la traza del proyecto se desarrolla en un alto porcentaje de material aluvial (Qal), coluvial (Qcl) y depósitos de talud (Qdt), con las excepciones que se mencionan a continuación:

Del km 195+200 al 196+450, el ducto se asentará atravesando calizas y lutitas (KapCzLu).

Del km 199+500 al 200+150, el proyecto escindirá roca lutita-arenisca (JktLuAr).

En el tramo nuevamente se presenta la condición de emplazar la obra del ducto sobre rocas calizas conteniendo facies de Yeso, en los cadenamientos 195+300 al 195+900, 200+150 al 200+450.

Aun cuando en campo no se detectaron evidencias físicas, es conveniente mencionar que la cartografía reporta que en el cadenamiento 207+800 existe una cabalgadura con línea de traza NW-SE y desplazamiento hacia el NE.

Finalmente se menciona que al final del Spread-2, la traza de proyecto cortará rocas de la formación más antigua que conforma la región en estudio, los Esquistos Aramberri de edad paleozoica, los cuales se encuentran intemperizados y fracturados.

SPREAD 3

El tercer segmento, que va del km 210+000 al 309+000, incluye la Sierra Madre Oriental a Matehuala, el cual manifiesta una topografía de valles inter-montanos y sierras escarpadas de pre-cuenca de la Sierra Madre Oriental. Las rocas características de este segmento corresponden a edades que van desde el Paleozoico, hasta la Era Cenozoica. En este tramo se encuentran variadas estructuras geológicas que influyen en el emplazamiento del futuro gasoducto.



DEL KM 210+000 AL KM 309+000

Tramo que da inicio con el afloramiento de la roca que conforma el basamento de la región, los Esquistos Aramberri, de edad Paleozoica. Este material se encuentra altamente fracturado (debido a su naturaleza bandeada), intemperizada y alterada. El aluvión que se muestrea en el área está compuesto de “Limo color café claro, con arena y roca triturada, se detecta la presencia de CaCO_3 ”, la consistencia va de dura a firme. Este material también se cortará durante el emplazamiento del ducto en los km 214+200 al 214+700 y del 215+700 al 216+000.

Del km 211+150 al 211+500 afloran yesos Jurásicos de color beige claro, empacados en una matriz areno-arcillosa de tonalidad rojiza, bien litificados; en cambio de facies también se identificó caliza color gris oscuro muy fracturada

Del cadenamamiento 211+500 al 232+750, superficie con gran predominancia de aluviones (Qal) y coluviones (Qcl) y pie de talud (Qdt), que únicamente se ven interrumpidos por algunos pequeños afloramientos. Los estudios resistivos y sísmicos indican que las rocas subyacentes van desde calizas, dolomitas, areniscas, algunos yesos e incluso lutitas-areniscas con calidad media a buena, en profundidades mayores a 10 m. y en casi todos los casos arables al 100%.

Del km 213+200 al 213+700 y 221+300 al 224+400. Aun cuando el eje de la traza solo tocará ocasionalmente la roca compuesta por calizas y algunos yesos clasificados de buena a mala calidad. En ambos casos los valores de ondas longitudinales confirman que en superficie la roca está sumamente fracturada, además de indicar que a profundidades mayores a 12 m. su calidad de roca mejora ostensiblemente.



En el cadenamiento 217+900, el INEGI, mediante su cartografía reporta al norte del eje de proyecto; la falla de cabalgadura “La Escondida”, de la que no se detectó expresión superficial en la zona de influencia al proyecto.

En el cadenamiento 232+750 y hasta el 233+250, la traza de proyecto parece cortar una roca caliza, aun cuando los estudios indican que esta roca se encontrará, al menos, a un par de metros de profundidad; con calidades de regulares a malas. Las cuales, como se ha observado en la mayoría de los casos, mejora su condición con la profundidad.

Siguiendo el trayecto del eje, encontramos material aluvial conformado por arcilla de consistencia media a dura con resistencias (qu) obtenidas en laboratorio, de valores sumamente bajos. Este material está presente hasta arribar al cadenamiento 265+250 y hasta el 267+750, sitio en el que aflora un conglomerado Polimíctico empacado en materiales finos.

El eje de proyecto continuará cortando material aluvión (Qal) compuesto por Arcilla (CL) de consistencia media a muy firme, el cual presenta grandes espesores que probablemente rebasen los 20 metros. La resistencia (qu) es variable mostrando que es muy consistente, y completamente arable. El aluvión llega al cadenamiento 292+200 y lo conforma Arcilla color café con arena, de consistente a dura. Le subyace a poca profundidad lutitas y margas de color gris oscura con tonalidad rojiza.

Sobre el eje de la traza, del cadenamiento 292+200 al 293+400, afloran intercalaciones de roca Caliza y lutita de color gris con tonalidades rojizas que presentan un RQD (índice de calidad de roca) muy bajo, aun cuando las velocidades de la sísmica de refracción, mejora a partir de 8 metros de profundidad. El aluvión representado por arcilla de consistencia dura, continúa rellenando la superficie por donde se ha trazado el eje del ducto, apareciendo hasta el final del spread (km 309+000). Y aun cuando la exploración geofísica sugiere que continúa supra yaciendo la roca caliza-lutita; a partir



del km 305+000 las anomalías resistivas y las velocidades de sísmica que incrementan en esta fase final del segmento, sugieren que la roca que subyace varía a una roca caliza de regular calidad.

SPREAD 4

Este cuarto y último segmento comprende del km 309+000 al 451+565, entre Matehuala y San Luis Potosí. Corresponde a una topografía de transición entre la pre-cuenca de la Sierra Madre Oriental y los lomeríos bajos y llanuras de la mesa central de la Altiplanicie Mexicana. La composición litológica corresponde exclusivamente a rocas sedimentarias de edad Cretácica y Cenozoica, compuesta por Calizas, sedimentos lacustres, travertino y yeso, así como depósitos coluviales y aluviales.

A continuación se efectúa la descripción geotécnica de este segmento:

DEL KM 309+000 AL 451+565

Debido a las características geomorfológicas de la región el tramo muestra topografía de transición entre las sierras escarpadas de la Sierra Madre Oriental y los lomeríos y llanuras de la Mesa Central.

El extenso segmento que ocupa este Spread 4, está constituido en superficie, casi en su totalidad por materiales aluviales compuestos por arcilla de consistencia que varía de media, firme y muy firme.

El material en el que se estará asentando el ducto, prácticamente inicia correspondiendo a roca caliza color gris, poco fracturada con vetillas de CaCO_3 , condición que en superficie se presentara solo hasta el km 309+900.



Se hace mención que en el cadenamiento 309+500 se encuentra una zona que cruza la falla normal “La Gavia” (cartografiada por el INEGI) además, cercano al sitio (también cartografiada por el INEGI), se señala la existencia de otra falla lateral denominada “Tlacuache”. Las evidencias detectadas en el sitio son los indicios de carsticidad encontradas en la zona.

Continuando en superficie, a partir del km 309+900, el emplazamiento del ducto continuará excavando en aluvión de espesor variable (espesores de 2 a mayores a 16 metros), hasta el km 429+000, donde aflora roca caliza.

Siguiendo el eje del trayecto, los estudios geofísicos y PCA realizados, únicamente detectaron aluvión compuesto por arcilla de consistencia que varía entre media y dura.

Es importante resaltar que debido a la presencia de depresiones y oquedades en el terreno, cercanas al cadenamiento 369+500, se acordó realizar un estudio geofísico con su respectivo reconocimiento geológico, para determinar la posible existencia de alguna anomalía que pudiera evidenciar la posible falla. Los trabajos concluyeron la inexistencia de falla geológica, solo encontrando una zona de carsticidad en el trayecto.

Seguidos en este último cadenamiento (380+600) hasta el km 385+600 por roca caliza que se encuentra aflorando; la caliza fue descrita como medianamente fracturada, de calidad regular a buena. Aunque la expresión superficial es de presentar únicamente aluvión, con aproximadamente 2 metros de espesor. La exploración geofísica también reveló la presencia de la caliza. La misma condición de caliza que infra yace al aluvión y que no aflora, se encuentra después de un largo tramo de aluvión con espesores mayores de 20 m; apareciendo entre el intervalo del 402+000 al 405+500. Apareciendo la caliza nuevamente después de un extenso y profundo relleno de aluvión; para aflorar en el intervalo del km 429+000 al 430+400.



CAPITULO VI

DISEÑO GEOTÉCNICO DE LAS ESTACIONES DE COMPRESIÓN

Las Estaciones de Compresión I y II forman parte de un prototipo de estructuras conformadas por un conjunto de edificaciones y parque de operaciones, destinadas a la medición y regulación de presión con la que se hace circular el gas dentro de la tubería. Por lo tanto, el proyecto de cimentación se realizara con base en las características particulares de cada zona de estudio.

VI.1 ESTACIÓN DE COMPRESIÓN I

VI.1.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS

A partir de los trabajos de exploración, se logró definir una estratigrafía puntual del sitio de proyecto, la cual, se describe a continuación:

Estrato 1: Superficialmente y con un espesor variable de 0.0 a 0.60 m en promedio, se localiza una capa vegetal conformada por arcilla café verdoso con poca arena, la cual, se recomienda retirar totalmente de la zona, toda vez que es un material heterogéneo y no ofrece las características de calidad mínimas mencionadas en la Normativa SCT, para la conformación de capas estructurales de terracería.

Estrato 2: De 0.60 a 5.60 m en promedio se tiene una roca sedimentaria (lutita), de coloración gris, intemperización moderada y sin fracturas hasta 5.50 m, con una calidad de roca de muy mala a mala de acuerdo a su RQD, tomando en cuenta las pruebas mecánicas realizadas a especímenes extraídos de este estrato, se tiene un peso volumétrico de 2.60 t/m^3 y una resistencia a la compresión simple $q = 158.14 \text{ kg/cm}^2$.



Estrato 3: De 5.60 a 12.0 m en promedio, se tiene una roca sedimentaria (lutita), de coloración gris a verdosa, presencia de fracturas moderadas, ligeramente intemperizada y una calidad de roca de regular a buena de acuerdo a su RQD, se tiene un peso volumétrico de 2.48 t/m^3 y una resistencia a la compresión simple $q = 150.6 \text{ kg/cm}^2$.

Estrato 4: De 12.0 a 20.0 m en promedio, se tiene una roca sedimentaria (lutita), de coloración gris, sin intemperización y poco fracturada, con una calidad de roca de regular a buena de acuerdo a su RQD, tomando en cuenta las pruebas mecánicas de este estrato, se tiene un peso volumétrico de 2.53 t/m^3 y una resistencia a la compresión simple $q = 190.37 \text{ kg/cm}^2$.

Los módulos de elasticidad de cada estrato, se obtuvieron de los ensayos de Compresion simple realizados a los núcleos de roca representativos de cada estrato.

El proyecto de cimentación se resolvió con una cimentación superficial a base de zapatas aisladas, desplantadas a una profundidad máxima de 3.0 m respecto al nivel de terreno natural, en el estrato rocoso y después de retirar la capa superficial de suelo, y fragmentos de roca empacados en arcilla, es decir, apoyando la zapata en cuya roca presenta un RQD mínimo de 75% y se mantenga este valor como mínimo, en al menos 1.5B de profundidad.

De los ensayos de laboratorio realizados en los núcleos de roca, se logró definir un modelo geotécnico con las propiedades y parámetros de resistencia del subsuelo, los cuales se muestran en la tabla VI.1



CAPITULO VI. DISEÑO GEOTECNICO DE LAS ESTACIONES DE COMPRESION

N° ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN q_u (ton/m ²)	PESO VOLUMÉTRICO γ (ton/m ³)	RELACIÓN POISSON	COHESIÓN C (ton/m ²)	ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA °	TIPO DE ROCA
	DE	A						
2	0.60	5.60	1,581.0	2.60	0.26	15.7	7.00	Lutita intemperizada
3	5.60	12.00	1,506.0	2.48	0.28	26.5	12.00	Lutita
4	12.00	20.00	1,903.0	2.53	0.29	33.8	12.00	Lutita

Tabla VI.1 Parámetros de resistencia del suelo de apoyo



VI.1.2 PRESIÓN ADMISIBLE EN ROCA

De la exploración geotécnica, se sabe que la Estación de Compresion I estará desplantada sobre un estrato rocoso, del cual, se extrajeron núcleos representativos para determinar las propiedades mecánicas que intervienen en el cálculo de la presión admisible de la roca, indicadas a continuación:

- Resistencia a la compresión simple de la roca
- Tipo de roca
- Grado de alteración
- Valor del RQD y separaciones de litoclasas

Los parámetros mencionados en los incisos anteriores, deben ser los representativos del comportamiento del volumen de roca situado bajo la cimentación hasta una profundidad de $1.5B$, medido desde su plano de apoyo.

La presión admisible puede determinarse mediante la siguiente expresión (Jiménez Salas, J.A. 1980: Geotecnia y cimientos, Editorial Rueda, Madrid):

$$P_{VADM} = P_o \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \sqrt{\frac{q_u}{P_o}}$$

Dónde:

P_{vadm}	Presión admisible
P_o	Presión de referencia, igual a 1 MPa.
q_u	Resistencia a compresión simple de la roca sana
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Parámetros adimensionales que dependen del tipo de roca, de su grado de alteración y del espaciamiento de las litoclasas



VI.1.3 INFLUENCIA DEL TIPO DE ROCA

Existen rocas cuya estructura es más proclive a contener planos de debilidad no detectados en los sondeos ni en los ensayos de compresión simple. Atendiendo a este aspecto las rocas pueden clasificarse en varios grupos, partiendo de un primer grupo en el que no se temen fisuras o grietas no detectables por los reconocimientos y terminando en un cuarto grupo en el que el tipo de formación rocosa es proclive a contener otros planos de debilidad aparte de los detectables con los ensayos de compresión simple realizados en laboratorio.

El parámetro α_1 puede determinarse en laboratorio ensayando muestras a tracción para medir la relación que existe entre la resistencia a tracción simple q_t y la resistencia a compresión simple q_u . El valor del parámetro α_1 será:

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{10 \times q_t}{q_u}}$$

Una manera rápida para estimar el valor de α_1 , es con base a las correlaciones siguientes:

GRUPO N°	NOMBRE GENÉRICO	EJEMPLOS	α_1
1	Rocas carbonatadas con estructura bien desarrollada	Calizas, dolomitas, mármol puro, Calcarenitas de baja porosidad	1.0
2	Rocas ígneas y metamórficas	Granito, cuarcita, andesita, riolita, pizarra, esquisto y gneis	0.8
3	Rocas sedimentarias y algunas metamórficas	Caliza margosa, argilitas, limolitas, pizarra, esquisto y yeso	0.6
4	Rocas poco cementadas	Arenisca, limolita, conglomerado poco cementado y marga	0.4

Tabla VI.2 Valores de α_1 de acuerdo al tipo de roca



VI.1.4 INFLUENCIA DEL GRADO DE METEORIZACIÓN

Para caracterizar el grado de meteorización correspondiente a la roca que existe en el entorno de la cimentación, se usará el mayor grado de alteración que pudiera existir hasta alcanzar una profundidad igual a 1,5 B, medida bajo el plano de apoyo.

Los valores que se recomiendan para establecer el valor del parámetro α_2 son los siguientes:

GRADO DE METEORIZACIÓN	TIPO	α_2
I	Roca sana o fresca	1.0
II	Ligeramente meteorizada	0.7
III	Moderadamente meteorizada	0.5
>IV	Meteorizada (Suelos)	--

Tabla VI.3 Valores de α_2 de acuerdo al tipo de roca

VI.1.5 INFLUENCIA DEL ESPACIAMIENTO ENTRE LITOCLASAS

La separación entre las litoclasas debe caracterizarse de dos formas diferentes:

- Mediante censo de litoclasas en afloramientos próximos a la cimentación.
- Mediante el valor del RQD en los sondeos mecánicos.

En todo caso, la zona de referencia será el volumen de roca situado bajo la cimentación hasta una profundidad igual a 1,5 B.

Partiendo de estos datos, se calculará α_3 mediante la siguiente expresión.



$$\alpha_{3b} = \sqrt{\frac{RQD(\%)}{100}}$$

Dónde:

RQD Valor del parámetro “Rock Quality Designation”, expresado en %.

VI.1.6 ASENTAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA

De acuerdo con el tipo de material encontrado (roca) a la profundidad de desplante recomendado y conforme a los resultados obtenidos en la prueba de penetración estándar, será prácticamente nulo y que las deformaciones que se presenten serán inmediatas al momento de la construcción, es decir se presentarán deformaciones de tipo elástico.

Para el cálculo de los asentamientos de tipo elástico, se procedió a realizar el análisis de asentamientos con la teoría de la elasticidad mediante la ecuación mostrada a continuación (Método de Steinbrenner).

$$\Delta H = q_0 B' \frac{1 - \mu^2}{E_s} \left(I_i + \frac{1 - 2\mu}{1 - \mu} I_2 \right) I_F$$

Dónde:

- q_0 Presión de contacto kg/cm^2
- B' Ancho de cimentación cm
- E Modulo de elasticidad del suelo kg/cm^2
- μ Relación de Poisson del suelo
- I_i, M, N Factores de influencia que se calculan con las expresiones siguientes



VI.1.7 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez desarrolladas las teorías antes expuestas, bajo las condiciones geotécnicas determinadas en laboratorio, se obtuvieron los valores de presión admisible en roca para desplante de las estructuras que conforman la Estación de Compresión I. El valor de la presión admisible se calculó para los diferentes estratos detectados en la exploración geotécnica, los resultados se presentan a continuación:

N° ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)		q _u (ton/m ²)	E (ton/m ²)	γ (ton/m ³)	PRESIÓN REFERENCIA (ton/m ²)	α ₁	α ₂	α ₃	PRESIÓN ADMISIBLE (ton/m ²)
	DE	A								
2	0.60	5.60	1,581.0	1,039,990.0	2.60	102.00	0.40	0.50	0.54	44.00
3	5.60	12.00	1,506.0	1,575,750.0	2.48	102.00	0.40	0.70	0.77	85.00
4	12.00	20.00	1,903.0	913,170.0	2.53	102.00	0.40	1.00	0.87	153.00

Tabla VI.4 Presiones admisibles para cimentaciones superficiales desplantadas en lutita

Para el desplante de las estructuras que conforman la Estación de Compresión I, se utilizara el sistema de cimentación superficial a base de zapatas corridas desplantadas en roca a una profundidad máxima de 3.0 m , cuyos asentamientos calculados se presentan a continuación:

Asentamientos (cm)				
D _f =	0.0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
B (m)	q _{adm} = 1.0 (ton/m ²)			
1.0	0.4	0.3	0.2	0.2
2.0	0.6	0.5	0.4	0.4
3.0	0.8	0.7	0.6	0.6

Tabla VI.5 Asentamientos unitarios (1 t/m²) para zapatas corridas



Con los datos obtenidos fue posible determinar los módulos de reacción vertical generados en la base de la zapata corrida.

Módulos de reacción vertical ($K= q / \delta$) para zapatas corridas (t/m^3)				
$D_f=$	0.0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
B (m)	$q_{adm}= 1.0 \text{ (ton/m}^2\text{)}$			
1.0	21687	28066	32906	38168
2.0	14601	17848	19179	20725
3.0	12118	13499	14219	15684

Tabla VI.6 Módulos de reacción vertical para zapatas corridas

VI.2 ESTACIÓN DE COMPRESIÓN II

VI.2.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS

Estrato 1: Superficialmente y con un espesor promedio de 0.80 m, se localiza una capa vegetal, conformada por arcilla café obscura con poca arena fina, con presencia de raíces en todo su espesor. Es importante mencionar que solo en algunas zonas y con superficies mínimas este estrato llega alcanzar 1.20 y 1.60 m de espesor.

Estrato 2: De 0.80 m a 4.0 m de profundidad promedio, se presenta una arcilla con arena fina de color café claro, este estrato opone una resistencia al penetración estándar variable entre 10 y 18 golpes, en función de correlaciones se le atribuye una consistencia media, contiene vetas de $CaCO_3$. De acuerdo con las pruebas de laboratorio presenta un contenido de agua del 14%, un límite líquido del 36%, un límite plástico del 20%, una composición granular de 0% de gravas, 7% de arenas y 93% de finos, la cual se clasifica según el SUCS como CL. Tomando en cuenta las pruebas mecánicas realizadas en este estrato se obtiene un peso volumétrico de 1.45 t/m^3 , una cohesión de 5.0 t/m^2 , un ángulo de fricción de 22° , S_s de 2.65 y un módulo de elasticidad $E=210 \text{ kg/cm}^2$.



Estrato 3: De 4.0 a 7.0 m de profundidad promedio, una arcilla con arena fina de color café claro, este estrato tiene una resistencia a la penetración estándar variable entre 13 y 20 golpes, en función de correlaciones se le atribuye una consistencia media; de forma aislada presenta gravas, fragmentos de roca y vetas de CaCO_3 . De acuerdo con las pruebas de laboratorio presenta un contenido de agua del 14%, un límite líquido del 36%, un límite plástico del 20%, una composición granular de 3% de gravas, 22% de arenas y 75% de finos, la cual se clasifica según el SUCS como CL. Tomando en cuenta las pruebas mecánicas realizadas en este estrato se obtiene un peso volumétrico de 1.60 t/m^3 , una cohesión de 10.0 t/m^2 , un ángulo de fricción de 18° , S_s de 2.65 y un módulo de elasticidad $E=220 \text{ kg/cm}^2$.

Estrato 4: De 7.0 a 20.0 m, se localiza una arcilla con arena fina de color café claro con una consistencia de media a firme, con presencia gravas y fragmentos de roca basáltica, con vetas de CaCO_3 , un valor de la prueba de penetración estándar de 25 a 50 golpes, contenido de agua promedio de 15%, un límite líquido del 35%, un límite plástico del 17%, una composición granular del 9% de gravas, 22% de arenas y 69% de finos, el cual se clasifica de acuerdo al SUCS como (CL). Las pruebas mecánicas este estrato arrojaron tiene un peso volumétrico de 1.85 t/m^3 , una cohesión de 15.0 t/m^2 , un ángulo de fricción de 16° , S_s de 2.65 y un módulo de elasticidad $E=342 \text{ kg/cm}^2$.

La solución de cimentación, con base en las características de resistencia del subsuelo, se definió por medio de una cimentación profunda a base de pilas circulares de concreto armado de diámetros variables entre 0.60, 0.80 y 1.00 m, desplantadas a una profundidad de 7.0 m. El modelo geotécnico se define en la tabla VI.7.



CAPITULO VI. DISEÑO GEOTECNICO DE LAS ESTACIONES DE COMPRESION

N° ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)		PESO VOLUMÉTRICO (ton/m ³)	COHESIÓN (ton/m ²)	ANGULO DE FRICCIÓN °	MODULO ELÁSTICO (ton/m ²)	SUCS
	DE	A					
2	0.80	4.00	1.45	5.0	22.00	2100.00	CL
3	4.00	7.00	1.60	10.0	18.00	2200.00	CL
4	7.00	20.00	1.85	15.0	16.00	3420.00	CL

Tabla VI.7 Parámetros de resistencia del subsuelo de apoyo.



VI.2.2 ANÁLISIS DE CIMENTACIÓN PROFUNDA

VI.2.2.1 CAPACIDAD DE CARGA POR PUNTA

Tomando en cuenta que la aportación de resistencia al esfuerzo cortante en el apoyo de la pila estará por un suelo cohesivo-friccionante, se decidió determinará la capacidad de carga última por punta con la expresión siguiente:

$$Q_p = A_p(cN_c + p'_v N_q)$$

Dónde:

- Q_p Capacidad de carga última por punta en t.
- C_u Cohesión en t/m^2
- N'_c Factor de capacidad de carga.
- N'_q Factor de capacidad de carga.
- A_p Área de la sección transversal de la punta del pilote en m^2
- P'_o Presión vertical efectiva inicial en la punta de la pila.

La determinación de los factores de capacidad de carga N^*_c y N^*_q , está en función del ángulo de fricción interna del suelo y se determina conforme a la curva emitida por Meyerhof, plasmada en la figura VI.1.

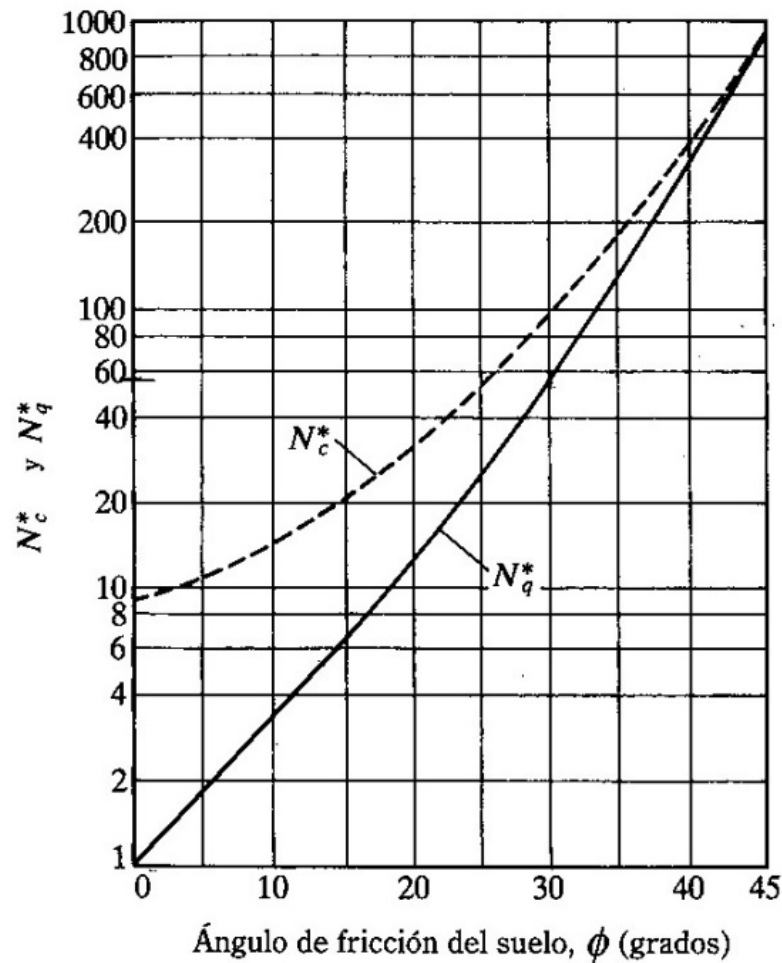


Figura VI.1 Gráfica para la determinación del N_c^* y N_q^*

VI.2.2.2 CAPACIDAD DE CARGA POR FUSTE

La capacidad de carga última por fuste, se determinó mediante la suma de las componentes friccionante y cohesiva, por lo que se recurrió al criterio de esfuerzos totales y efectivos conocidos también como “Método α ” y “Método β ” respectivamente, los análisis se desarrollaron mediante las siguientes expresiones.



Componente Cohesiva:

$$Q_s = \alpha C_{us} A_s$$

Dónde:

- Q_s Capacidad de carga ultima por fricción lateral en ton.
- α Factor de adherencia (para este caso = 0.2)
- C_{us} Resistencia al corte no drenada promedio a nivel de desplante t/m^2
- A_s Área de la sección transversal de la punta del pilote en m^2 .

Componente friccionante:

$$Q_s = \beta P_{os} A_s$$

Dónde:

- Q_s Capacidad de carga última por fricción lateral en ton.
- β Coeficiente de fricción lateral (para este caso = 0.3)
- P_{os} Presión vertical efectiva media a lo largo del pilote
- A_s Área de la sección transversal de la punta del pilote en m^2 .

VI.2.2.3 CAPACIDAD DE CARGA POR TENSIÓN

La capacidad de carga última por tensión, se determina por la fuerza que oprime la fricción lateral a lo largo del fuste y por el peso propio del pilote o pila, la ecuación general para determinar esta capacidad es:

$$Q_t = Q_{st} + W_p$$



Dónde:

- Qt Capacidad de carga última a la tensión o extracción.
- Q_{st} Capacidad última a la tensión, por fricción lateral.
- W_p Peso propio del pilote o de la pila.

En suelos cohesivos se estima con la ecuación.

$$Q_t = Lp\alpha c_{us} + W_p$$

Dónde:

- P Perímetro del pilote
- α Factor de adherencia entre pilote-suelo
- c_{us} Resistencia al corte
- L Longitud del pilote
- W_p Peso de la pila

VI.2.3 ASENTAMIENTOS DE LA ESTRUCTURA

Para estimar los asentamientos de una pila individual en condición estática, se toman en cuenta las deformaciones propias de la pila, así como la deformación de los estratos localizados bajo la punta.

El asentamiento de la pila se calcula con la relación siguiente:

$$\delta = \frac{Q_{WP} + C_p}{Dq_p} + \left(\frac{Q_{WS}}{PL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \nu^2) I_{WS}$$



Dónde:

- δ_t Asentamiento total
- Q_{WP} Carga en la punta del pilote
- Q_{WS} Carga por resistencia de fricción
- C_p Coeficiente empírico
- D Diámetro del pilote
- q_p Resistencia última en la punta del pilote
- P Perímetro del pilote
- L Longitud del pilote
- E_s Módulo de elasticidad del estrato de apoyo
- ν Relación de Poisson en el estrato de apoyo

VI.2.4 MÓDULOS DE REACCIÓN VERTICAL

El Módulo de reacción vertical para las pilas, se estimó con la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{E}{B(1 - \mu^2)}$$

Dónde:

- E Módulo de elasticidad del suelo
- B Ancho del pilote
- ν Coeficiente de poisson
- K_s Módulo de reacción vertical para análisis estáticos



VI.2.5 MÓDULOS DE REACCIÓN HORIZONTAL

Para el análisis de cargas y deflexiones laterales, se utilizó el criterio establecido por Pyke y Beikae (1983), en el que se hace intervenir el diámetro de la pila y el modulo elástico del suelo de contacto, cuya expresión es la siguiente:

$$K_s = \frac{0.90 E_s}{B}$$

Dónde:

- Ks Módulo de reacción horizontal para la condición de carga lateral
- Es Módulo de elasticidad del suelo
- B Diámetro del elemento

VI.2.6 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez desarrollados los criterios de análisis para la determinación de la capacidad de carga y deformaciones para una cimentación a base de pilas de concreto armado de 0.60, 0.80 y 1.0 m de diámetro, desplantadas en el estrato resistente detectado a 7.0 m de profundidad, y empotrados como mínimo 0.50 m, se presentan los resultados en la tabla VI.8.



CAPITULO VI. DISEÑO GEOTECNICO DE LAS ESTACIONES DE COMPRESION

DIÁMETRO PILA (m)	PROFUNDIDAD DESPLANTE (m)	PESO PROPIO PILOTE (ton)	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA (ton)			Qadm COMPRESIÓN (ton)	ASENTAMIENTO (cm)	K _{sv} (ton/m ³)	K _{sh} (ton/m ³)
			Q _{pu}	Q _{fu}	Q _{tu}				
0.60	7.00	4.75	114.0	3.0	58.0	39.0	0.70	4,029.00	6,044.00
0.80		8.44	202.0	5.0	79.0	70.0	0.90	3,022.00	3,400.00
1.00		13.19	315.0	7.0	101.0	109.0	1.20	2,418.00	2,176.00

Tabla VI.8 Resultados de capacidad de carga y asentamientos para pilas



CONCLUSIONES

INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA

La información obtenida de los estudios tratados en el presente documento, formaron la base para aterrizar un proyecto de gran importancia por el impacto económico que representa su ejecución. Las actividades desarrolladas tanto en campo como en laboratorio, fueron realizadas con un propósito muy específico, la interpretación relacionada de los estudios y los resultados de cada prueba de campo, fueron un determinante principal para identificar la geología del derecho de vía por donde se conduce el gasoducto, así como las propiedades físicas y de resistencia que presenta el subsuelo.

Como parte de la interpretación geológica y geotécnica del área estudiada, se tienen las siguientes conclusiones:

SPREAD 1

- Presenta una topografía de llanuras y lomeríos suaves.
- En espesores variables entre 2.0 y 3.5 m, se detectaron arcillas expansivas en los siguientes kilometrajes: del Km. 75+236 al 93+905 y del Km. 98+018 al 106+020.
- La recomendación es estabilizar las arcillas de la zanja donde se colocará el ducto, previa escarificación de la base de la zanja y con la adición de un 5% de Hidróxido de Calcio [Ca (OH)₂], respecto al peso volumétrico del material, mezclado de forma manual o mecánica, hasta obtener un material homogéneo.



SPREAD 2

- En el cadenamamiento 190+650 y 191+050 del proyecto, se localizó una falla activa denominada Falla Aramberri que muestra un desplazamiento lateral en forma de cizallamiento. **Se recomienda en esta sección, modificar el trazo original del proyecto.**

SPREAD 3

- El Spread 3 comprende de la Sierra Madre Oriental a Matehuala, manifestando una topografía de valles inter-montanos y sierras escarpadas de la Sierra Madre Oriental.
- Incluye litología variada que va desde rocas metamórfica como son los Esquistos Aramberri, así como sedimentarias tales como Calizas, Dolomías, Areniscas, Lutitas, Margas, y Brechas Calcáreas; además de materiales producto del intemperismo y alteración de las rocas circundantes, como son Conglomerados, Aluviales y Coluviales.
- Finalmente, se hace mención que al inicio de este Spread 3, el trayecto cruza por una zona de lomeríos, las cuales están coronadas por una roca caliza altamente fracturada; que aun cuando se encuentra retirado del eje de proyecto, durante la etapa de construcción puede presentar bloques caídos de gran tamaño.

SPREAD 4

- El eje de la traza comprende, en su mayoría, a una planicie con lomeríos bajos, encontrando también planicies cercanas a laderas de serranías.
- En su gran mayoría el eje de trazo será emplazado en amplios, extenso y profundos materiales de aluvión



- Es necesario tener presente que del km 366+750 al 372+250, se encuentran rocas calizas y yesos; donde se recomienda la adaptación de un sistema de drenaje eficiente para evitar el fenómeno de disolución.

INTERPRETACIÓN GEOTÉCNICA

Como se mencionó en capítulos anteriores, el proyecto para la construcción del Gasoducto Los Ramones Fase II, Tramo Sur, tiene contemplado la construcción de dos estructuras de importancia fundamental para el correcto funcionamiento del gasoducto; estas estructuras se denominan Estaciones de Compresión I y II, las cuales se ubican en los kilómetros 142+936 y 260+575 respectivamente.

Parte de los estudios de campo y exploración, fueron realizados con el objetivo de recabar la información necesaria para determinar los parámetros índice y de resistencia del subsuelo donde se desplantaran las estructuras, y en conjunto con las características del proyecto, realizar el análisis de capacidad de carga y deformaciones del suelo ante las cargas transmitidas.

La Estaciones de Compresion están conformadas por diversos equipos mecánicos, destinados a la generación, control y regulación de presión inyectada a la tubería por donde se conducirá el gas natural, la distribución arquitectónica fue adaptada a las condiciones del sitio donde se construirá, por lo tanto, las descargas generadas al subsuelo son similares y bajo las mismas condiciones de trabajo; por tal motivo, los estudios realizados, se enfocaron únicamente al análisis puntal de los efectos locales del punto de interés, tales como parámetros sísmicos, resistividad eléctrica y resistencia del subsuelo.



SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Para el diseño de la red de tierras físicas, y para conocer el grado de corrosión del suelo hacia las tuberías metálicas, se realizaron sondeos eléctricos verticales en las zonas donde se proyectó la construcción de las Estaciones de Compresion I y II. Los resultados se muestran a continuación:

ESTACIÓN DE COMPRESION I

SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS A (m)	HINCADO DE ELECTRODOS B (m)	RELACIÓN A/B	VALORES DE RESISTENCIA Ω	RESISTIVIDAD NATURAL Ω - m
1.0	0.16	6.25	4.41	28.95
2.0	0.27	7.41	2.28	29.5
3.0	0.27	11.11	1.55	29.7
5.0	0.27	18.52	0.91	28.8
6.0	0.27	22.22	0.77	29.2
8.0	0.27	29.63	0.65	32.9
10.0	0.27	37.04	0.57	36.1
16.0	0.27	59.26	0.51	51.3
PROMEDIO GENERAL CORREGIDO:			1.46	33.28

Tabla IV.1 Resultados promedio de Sondeo Eléctrico Vertical N° 1

RESULTADOS:

- Con base en el valor de resistencia óhmica de 1.46 Ω , se considera como *muy bueno* para aplicarse en baja tensión, y como *bueno* para uso de alta tensión
- El grado de potencial de corrosividad del suelo se clasifica como *corrosivo*.



ESTACIÓN DE COMPRESION II

SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS A (m)	HINCADO DE ELECTRODOS B (m)	RELACIÓN A/B	VALORES DE RESISTENCIA Ω	RESISTIVIDAD NATURAL Ω - m
1.0	0.16	6.25	11.87	77.8
2.0	0.27	7.41	5.02	65.1
3.0	0.27	11.11	2.58	49.4
5.0	0.27	18.52	0.79	25.2
6.0	0.27	22.22	0.58	22.0
8.0	0.27	29.63	0.39	19.6
10.0	0.27	37.04	0.29	18.2
16.0	0.27	59.26	0.16	16.6
PROMEDIO GENERAL CORREGIDO:			2.71	36.74

Tabla IV.2 Resultados promedio de Sondeo Eléctrico Vertical N° 2

RESULTADOS:

- Con base en el valor de resistencia óhmica de 2.71 Ω , se considera como *muy bueno* para aplicarse en baja tensión, y como *bueno* para uso de alta tensión
- El grado de potencial de corrosividad del suelo se clasifica como *corrosivo*.

CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS

ESTACIÓN DE COMPRESION I

En el Capítulo VI de este documento se analizó la capacidad de carga de la Estación de Compresion I, con base en las características del subsuelo de desplante. Los resultados de presión admisible de la roca y asentamientos de la estructura, se presentan en las tablas siguientes.



CONCLUSIONES

N° ESTRATO	PROFUNDIDAD (m)		PRESIÓN ADMISIBLE (ton/m ²)
	DE	A	
2	0.60	5.60	44.00
3	5.60	12.00	85.00
4	12.00	20.00	153.00

Tabla VI.4 Presiones admisibles para cimentaciones superficiales desplantadas en lutita

Asentamientos (cm)				
D _f =	0.0 m	1.0 m	2.0 m	3.0 m
B (m)	q _{adm} = 1.0 (ton/m ²)			
1.0	0.4	0.3	0.2	0.2
2.0	0.6	0.5	0.4	0.4
3.0	0.8	0.7	0.6	0.6

Tabla VI.5 Asentamientos unitarios (1 t/m²) para zapatas corridas

ESTACIÓN DE COMPRESION II

Como se mencionó en el subcapítulo VI.2, para la cimentación de la Estación de Compresion II se propuso un sistema a base de pilas circulares de concreto hidráulico desplantadas en el estrato resistente detectado a partir de los 7.0 m de profundidad. Los resultados de capacidad de carga y asentamientos se presentan a continuación:



CONCLUSIONES

DIÁMETRO PILA (m)	PROFUNDIDAD DESPLANTE (m)	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA (ton)			Qadm COMPRESIÓN (ton)	ASENTAMIENTO (cm)
		Q _{pu}	Q _{fu}	Q _{tu}		
0.60	7.00	114.0	3.0	58.0	39.0	0.70
0.80		202.0	5.0	79.0	70.0	0.90
1.00		315.0	7.0	101.0	109.0	1.20

Tabla VI.8 Resultados de capacidad de carga y asentamientos para pilas



BIBLIOGRAFIA

1. Terzaghi, K, Peck, B.R., y Mesri, G. (1996), Soil Mechanics in Engineering Practice, 3er Ed.
2. Hoek, E., P. K. Kaiser & Bawdeb (1995): Support of underground excavations in hard rock.
3. J. E. Bowles, “Foundation Analysis and Design”, McGraw Hill, Fifth edition, 1996, USA.
4. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils y muestreos con tubos de pared delgada (ASTM D-1586-84 y ASTM D-1587-08).
5. Geotecnia – Cimentaciones – Sondeo de pozos a cielo abierto (PCA) (NMX-C-430-ONNCCE-2002).
6. Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedence, and Earth Surface Potentials of a Ground System (ANSI/ IEEE STD 81-1983).
7. Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using The Wenner Four-Electrode Method.
8. Clasificación del suelo visual y al tacto, en estado húmedo y seco, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM-D2487).
9. Contenido de agua (ASTM D 2216 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass1)
10. Límites de Consistencia en materiales finos: Límite Líquido y Plástico (ASTM D4318 - 10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils).
11. Análisis Granulométrico por mallas o porcentaje de finos, dependiendo de que la muestra sea predominantemente granular o fina, respectivamente (ASTM D422 - 63(2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils).
12. Prueba triaxial (ASTM D2850 - Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Pression Test on Cohesive Soils).
13. Peso volumétrico natural. (ASTM D7263-09 Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens)



14. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil (ASTM D 2166).

15. CMT. Características de los materiales N-CMT-1-01/02

16. Cartas Geológicas y topográficas

San Ramón de Martínez	F14 – A16 (INEGI)
Zaragoza	F14 – A17 (INEGI)
Dr. Arroyo	F14 – A26 (INEGI)
Matehuala	F14 – A25 (SGM)
Sierra El Azul	F14 – A35 (SGM)
El Milagro de Guadalupe	F14 – A45 (SGM)
Llanos del Carmen	F14 – A54 (SGM)
Pozas Santa Ana	F14 – A55 (SGM)
Guadalcazar	F14 – A65 (SGM)
Los Ramones	G14 – C28 (INEGI)
La Unión	G14 – C38 (INEGI)
San José de las Flores	G14 – C48 (INEGI)
Linares	G14 – C58 (INEGI)
Garza Valdez	G14 – C68 (INEGI)
Villagrán	G14 – C78 (INEGI)
Aramberri	G14 – C87 (SGM)
Villa Hidalgo	G14 – C88 (INEGI)

17. Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1996. Carta Geológico – Minera Concepción del Oro G14-10, Escala 1:250,000, estados de Zacatecas, N.L., Coahuila y SLP. Pachuca, Hgo., Mex. El CRM es hoy el Servicio Geológico Mexicano.

18. Consejo de Recursos Minerales, 2000. Carta Geológico – Minera Matehuala F14-1, Escala 1:250,000, estados de S.L.P., Zacatecas, N.L. y Tamaulipas. Pachuca, Hgo., Mex.

19. Consejo de Recursos Minerales, 2004. Carta Geológico – Minera Linares G14-11, Escala 1:250,000, estados de Nuevo León y Tamaulipas. Pachuca, Hgo. Mex.

20. RAISZ, E. 1964. Landforms of Mexico. Map prepared for the Geography Branch of the Office Naval Research, Second Corrected Edition. Escala 1:3, 000,000. Cambridge, Mass.

21. Servicio Geológico Mexicano, 2008. Carta Geológico – Minera Río Bravo G14-8, Escala 1:250,000, estados de Nuevo León y Tamaulipas. Pachuca, Hgo., Mex.



BIBLIOGRAFIA

22. Servicio Geológico Mexicano, 2008. Carta Geológico – Minera Río Bravo G14-8, Escala 1:250,000, estados de Nuevo León y Tamaulipas. Pachuca, Hgo., Mex.
23. Servicio Geológico Mexicano, 2008. Informe de la Carta Geológico – Minera Río Bravo G14-8, Escala 1:250,000, estados de Nuevo León y Tamaulipas. Pachuca, Hgo., Mex.
24. Servicio Sismológico Nacional, 2013 Informe de la sismicidad en 2013 México.
25. Padilla y Sánchez, R., 2013. Tectonic map of México. Facultad de Ingeniería
26. ASTM (1995), Norma Técnica de Exploración Geofísica, ASTM D5777
27. Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad, B.2.3. “Pruebas de campo para determinar propiedades de los suelos y enrocamiento”
28. Manual de PEMEX, 1975; pp. 20.
29. Ruiz Reyes, Jaime A, et al; CNA Prospección geosísmica, parte 1; ITESA, ingeniería Técnica y Estudios S.A. de C.V.; México, 1992; pp. 114.
30. Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera, Universidad Politécnica de Madrid, Capitulo II, Cimentaciones en carretera.