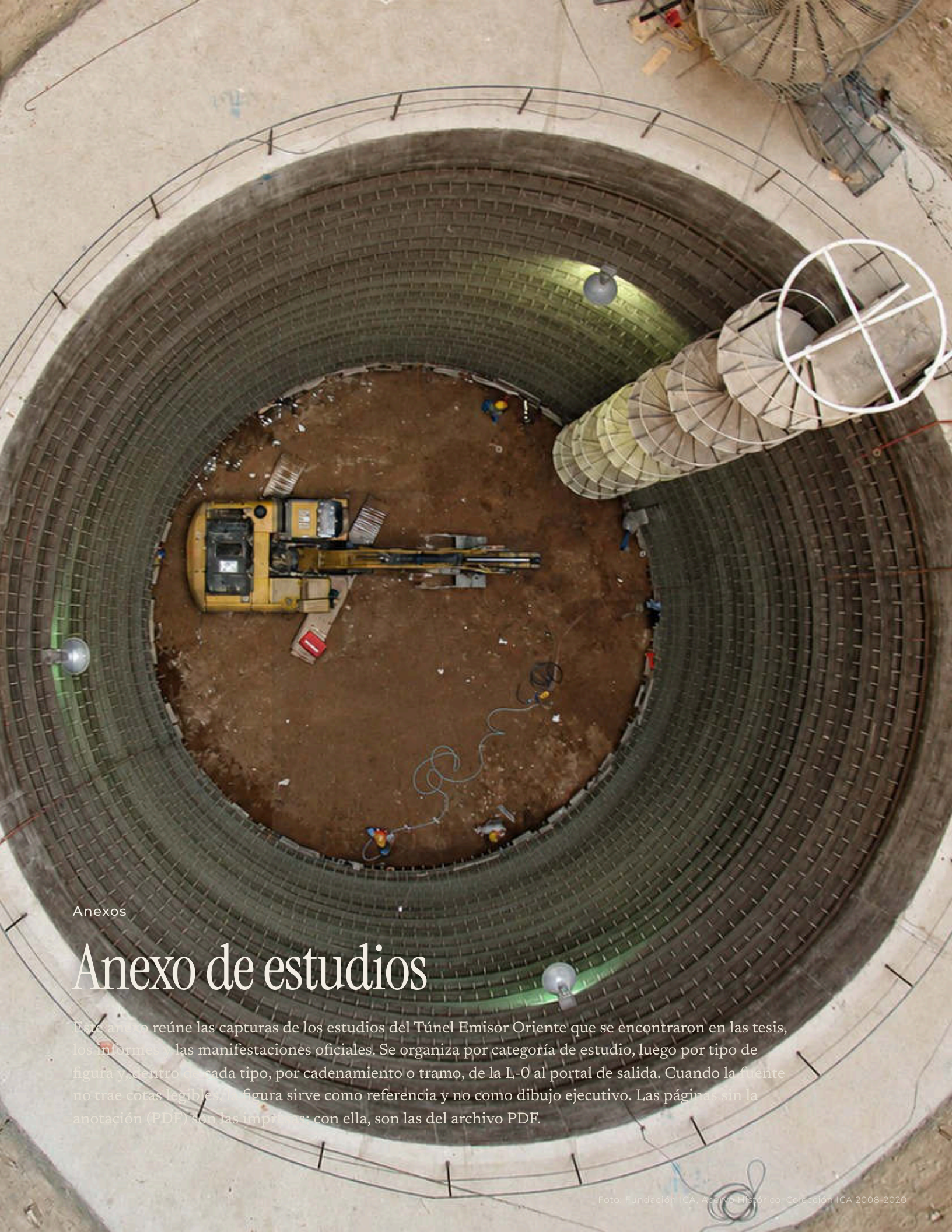




Anexos

Anexo de estudios

Este anexo reúne las capturas de los estudios del Túnel Emisor Oriente que se encontraron en las tesis, los informes y las manifestaciones oficiales. Se organiza por categoría de estudio, luego por tipo de figura y, dentro de cada tipo, por cadenamiento o tramo, de la L-0 al portal de salida. Cuando la fuente no trae cotas legibles, la figura sirve como referencia y no como dibujo ejecutivo. Las páginas sin la anotación (PDF) son las impresas; con ella, son las del archivo PDF.

Estudios topográficos

El estudio topográfico fija en el terreno dónde va la obra: levantamientos y configuraciones con coordenadas y cotas, y la cartografía base sobre la que se ubican el trazo, las lumbreras y los portales. Una configuración topográfica representa el relieve con curvas de nivel; un levantamiento ubica puntos medidos en campo. En el TEO sirvió de referencia para ubicar el eje y cada lumbrera, y para manejar la información en el sistema de información geográfica del proyecto.

MAPAS

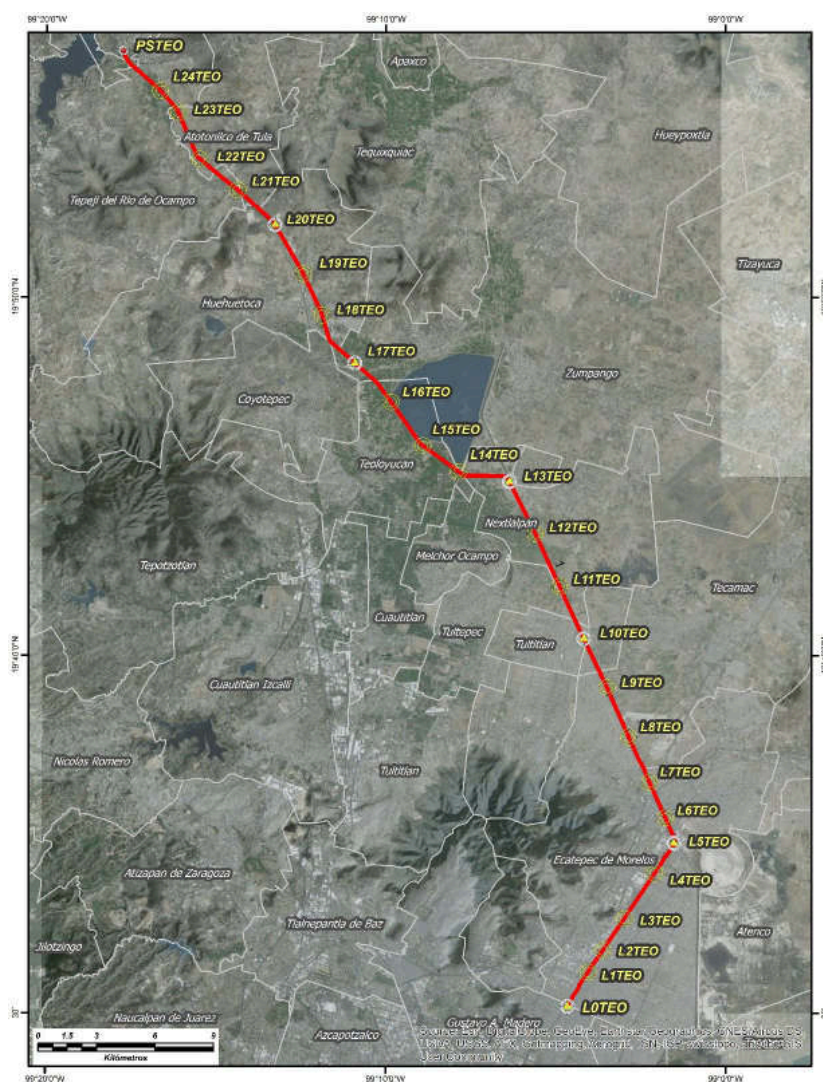


Figura 1. Mapa de localización del proyecto TEO en la cartografía de ingeniería básica

CONFIGURACIONES

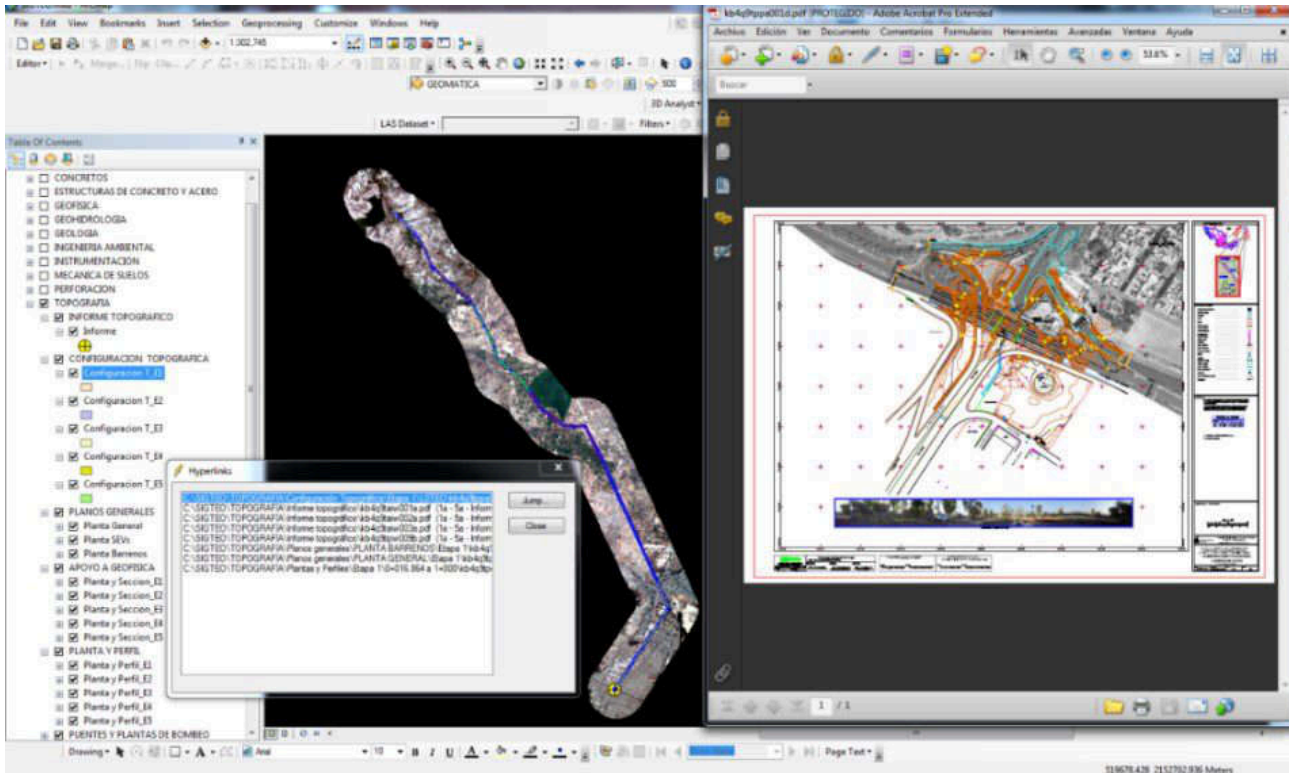


Figura 2. Configuración topográfica del TEO en el SIG

02

Estudios geológicos

El estudio geológico describe qué materiales hay bajo el trazo y cómo se acomodan. El mapa geológico muestra en planta las formaciones que afloran; el perfil geológico es un corte vertical a lo largo del eje, con la formación de cada tramo y el nivel del túnel; la sección geológica es un corte general que interpreta esa disposición. En el TEO sirvió para anticipar suelos blandos, tobas, basaltos y lutitas, y para elegir máquina y soporte por tramo.

PERFILES GEOLÓGICOS

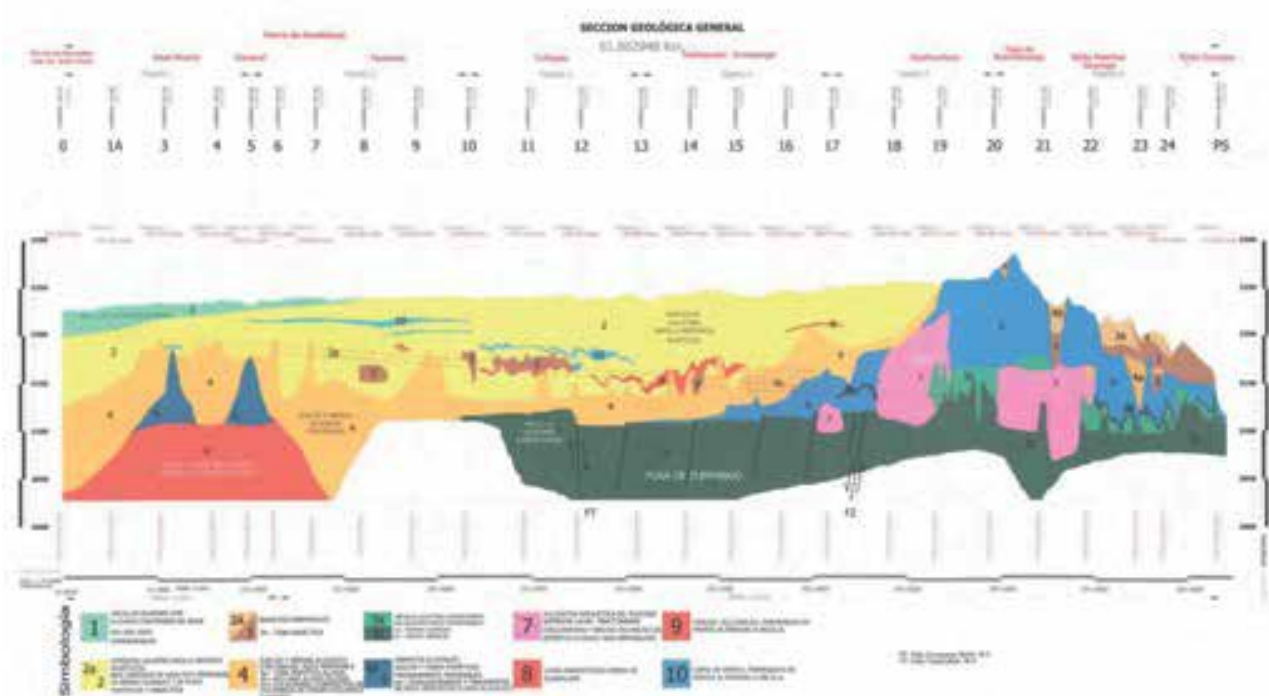


Figura 3. Sección geológica general del TEO usada en el artículo de la CFE-GEIC



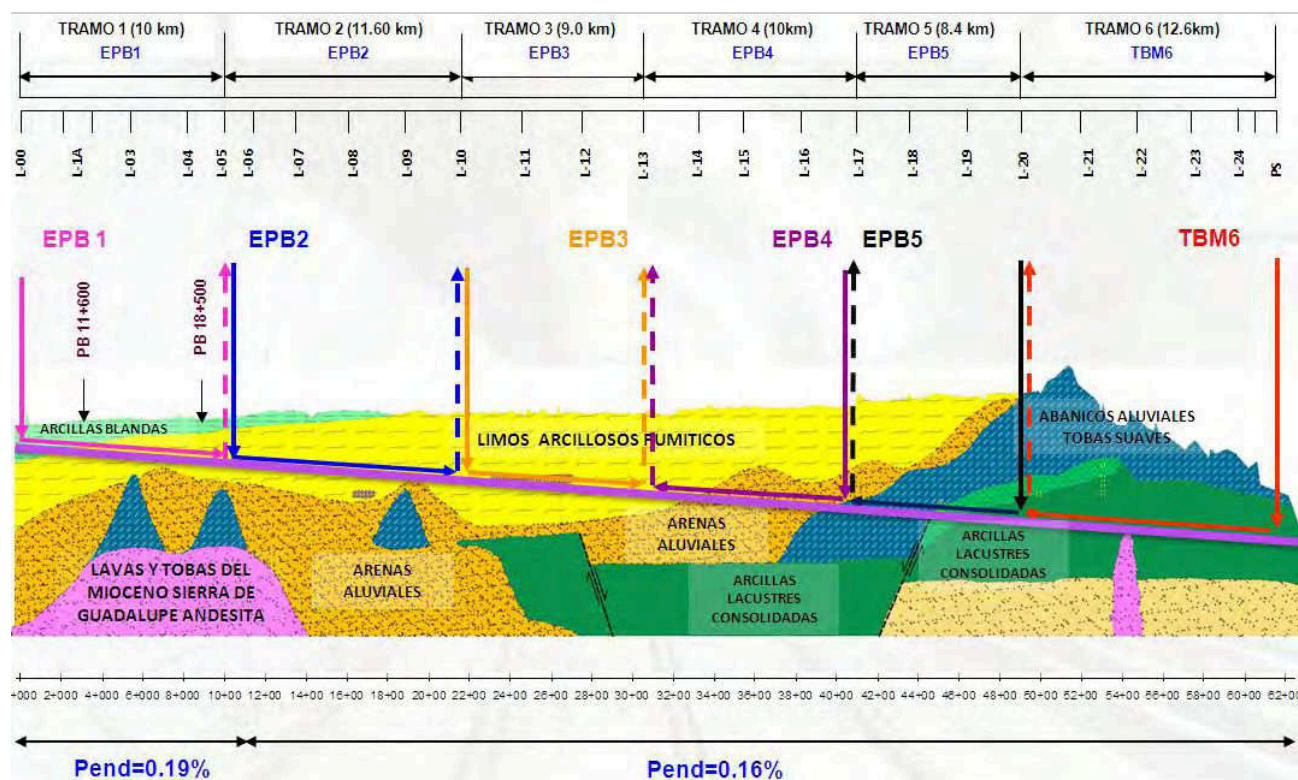


Figura 5. Perfil geológico por tramos con la máquina de cada uno

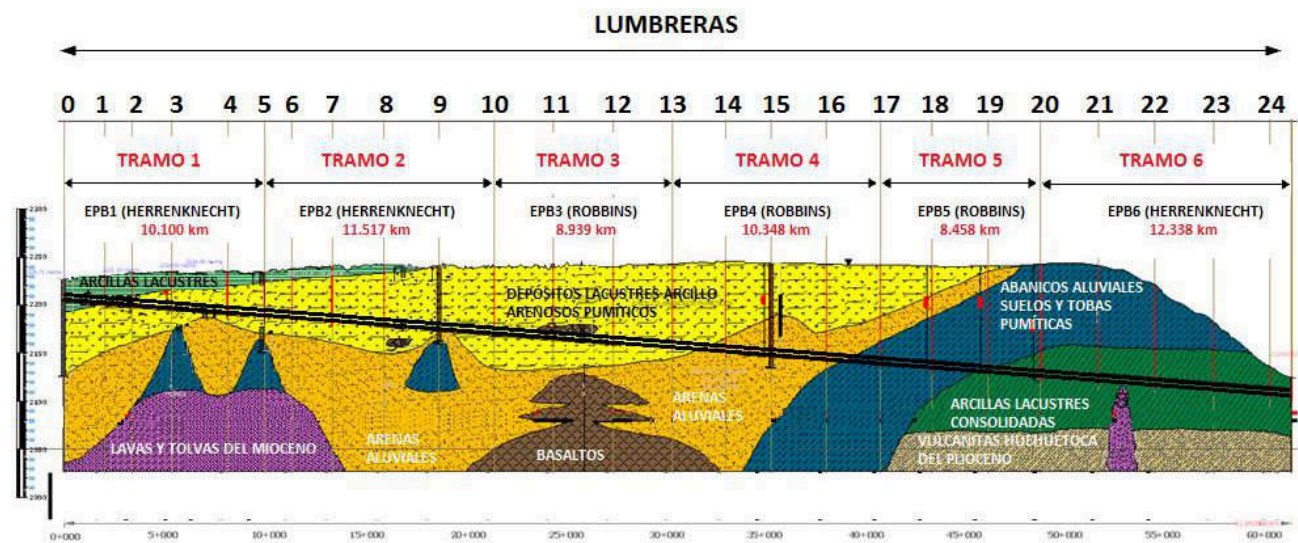


Figura 6. Perfil geológico para el diseño de las tuneladoras

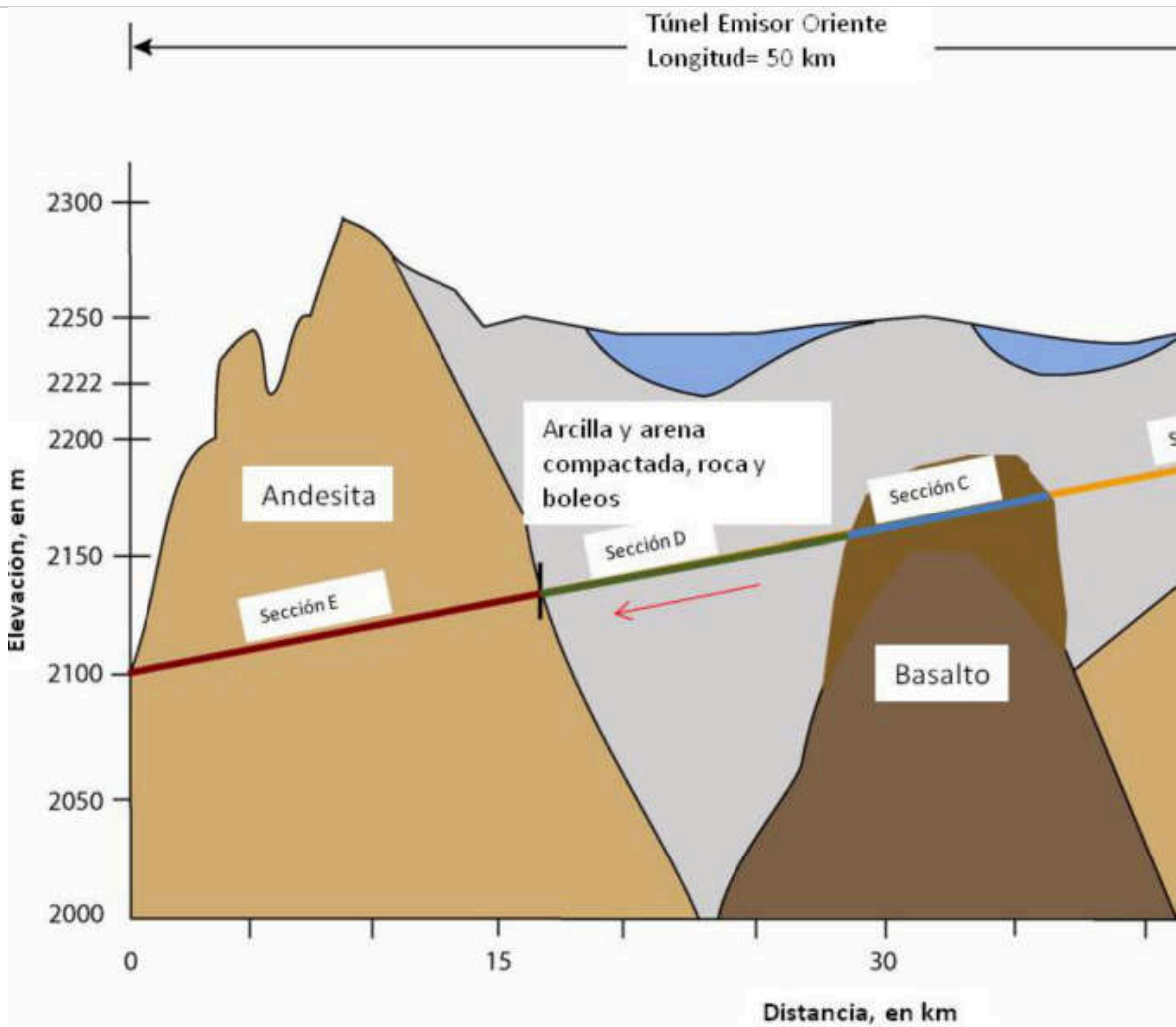


Figura II.3 Perfil geológico a lo largo del eje de trazo del Túnel Emi

Figura 7. Perfil geológico a lo largo del eje del trazo en la MIA-P

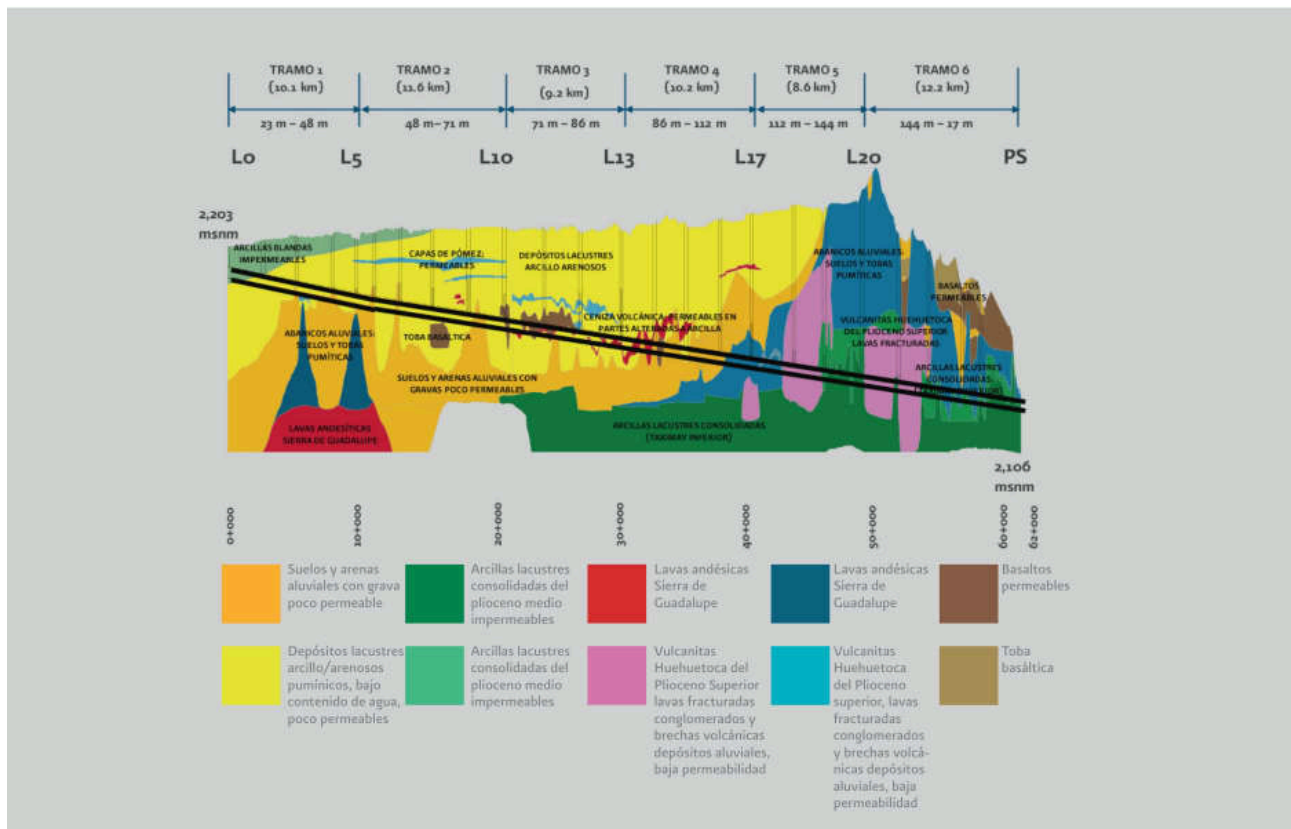


Figura 31. Perfil geológico a lo largo del TEO.

Figura 8. Perfil geológico a lo largo del TEO en el informe de la Conagua

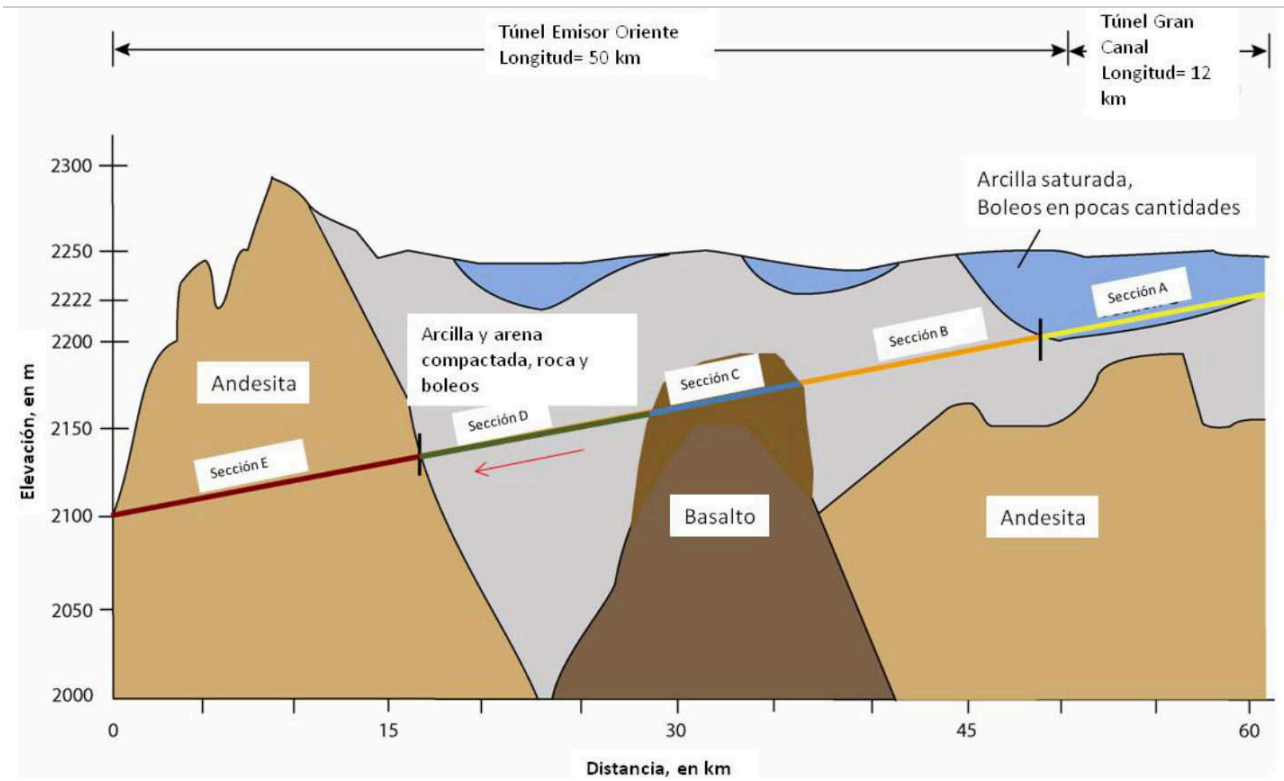
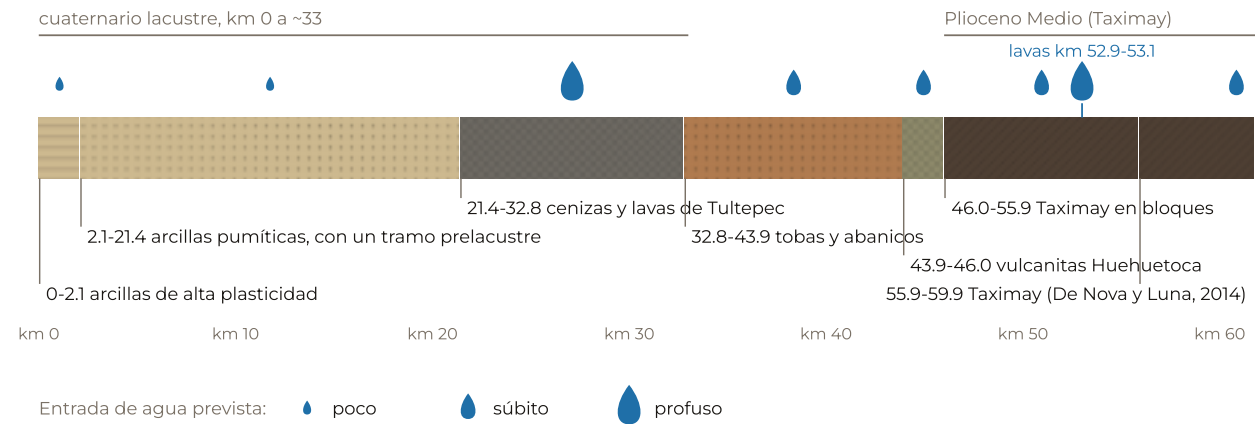


Figura IV.2 (Figura II.2 del capítulo II) Perfil geológico a lo largo del eje de trazo del

Figura 9. Perfil geológico del eje del trazo en el capítulo IV de la MIA-P

Seis formaciones a lo largo del trazo

y cuánta agua prometía cada una al frente de la tuneladora



Elaboración propia con datos de Gutiérrez Morales (2013, pp. 15-17 y 21-26) y De Nova y Luna (2014, p. 28). Agua en la arcilla: 300-400 % al sur, 150-200 % al

Figura 10. Perfil geológico en franja de las seis formaciones a lo largo de 62 km

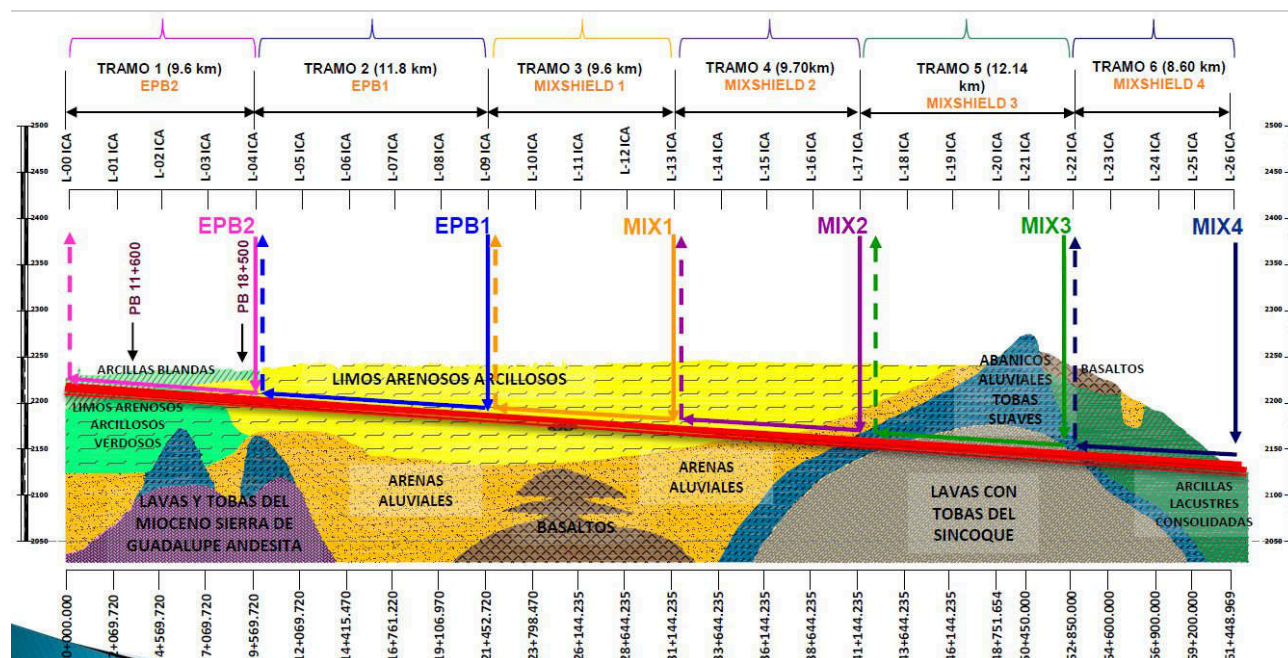


Figura 11. Perfil geológico de Mooser en elevación con la máquina de cada tramo

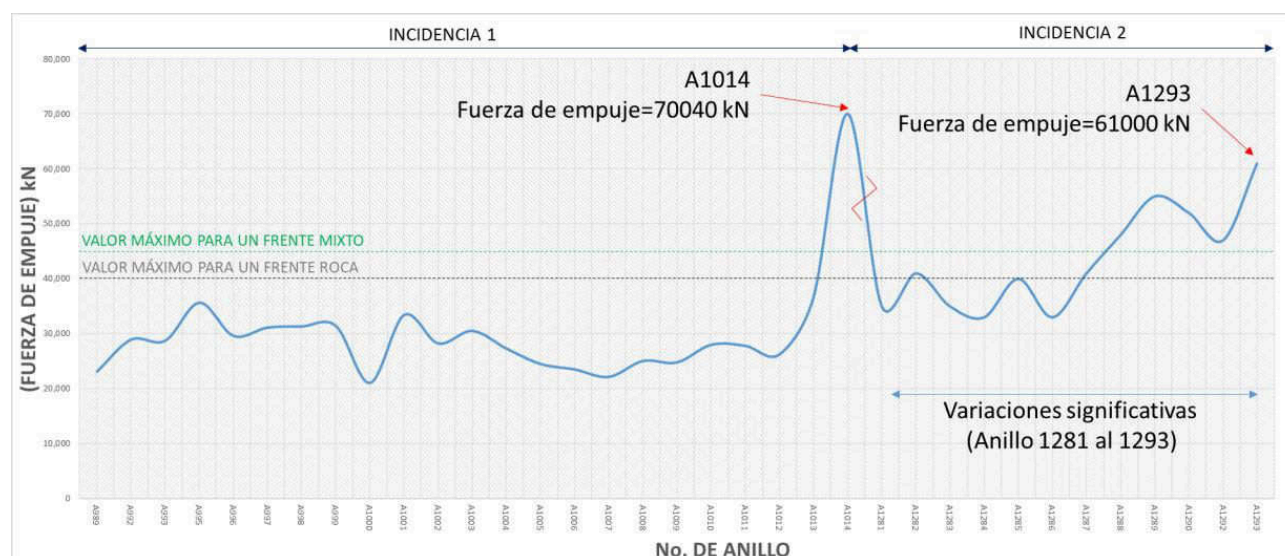


Figura 12. Perfil geológico con las transiciones del subtramo L10-L11

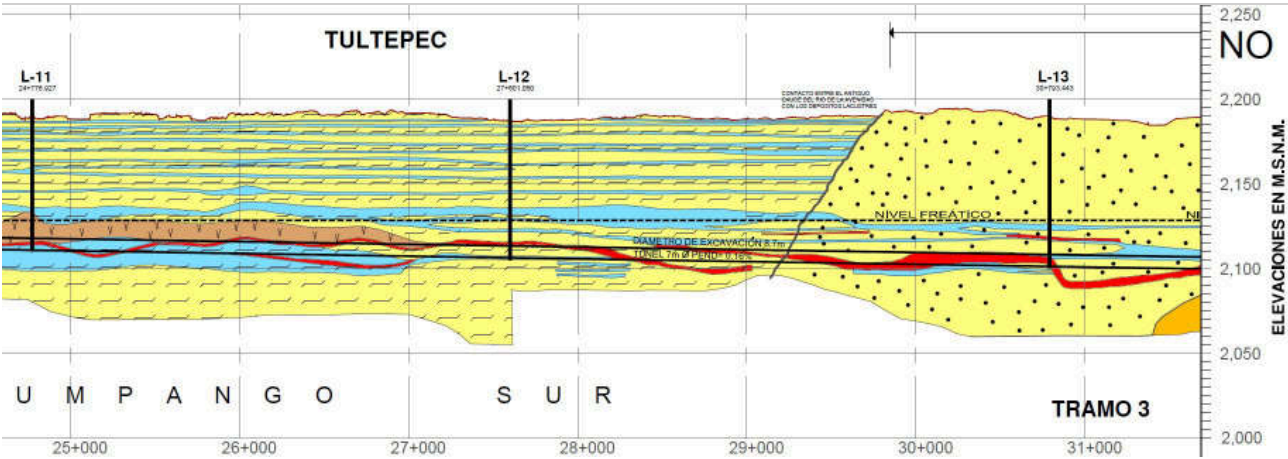


Figura 13. Perfil geológico asociado a la lumbrera L-12

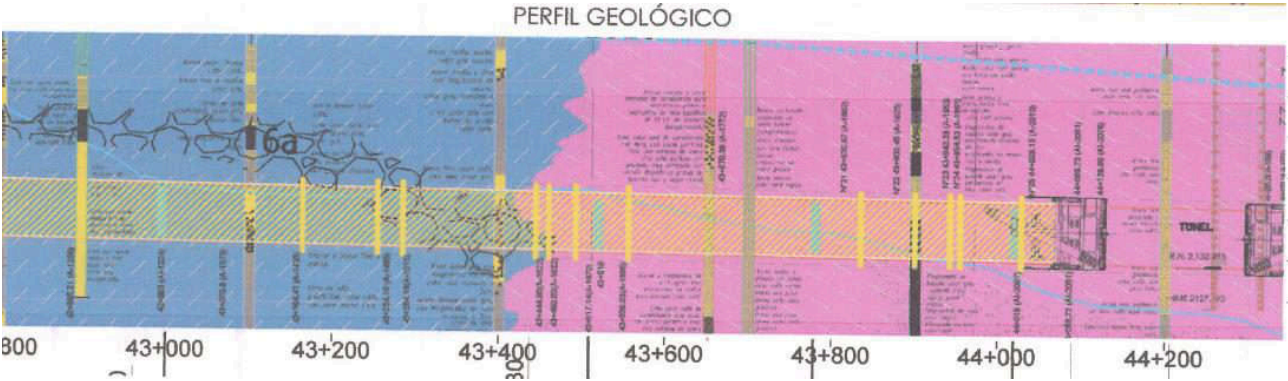


Figura 14. Perfil geológico del túnel L-17 a L-18

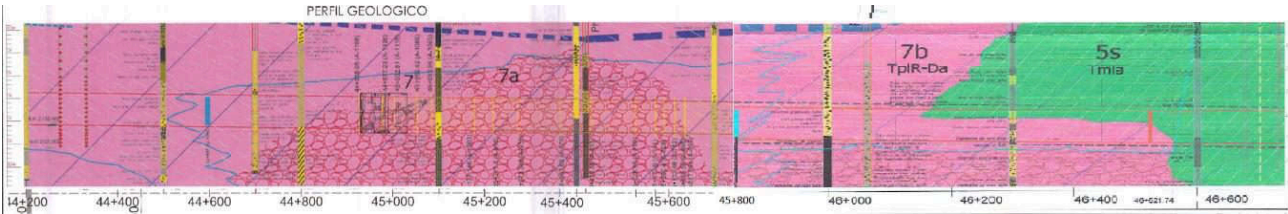


Figura 15. Perfil geológico del túnel L-19 a L-18

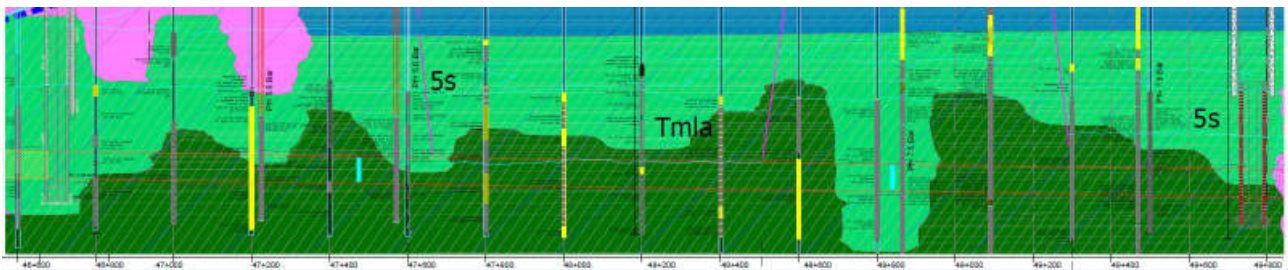


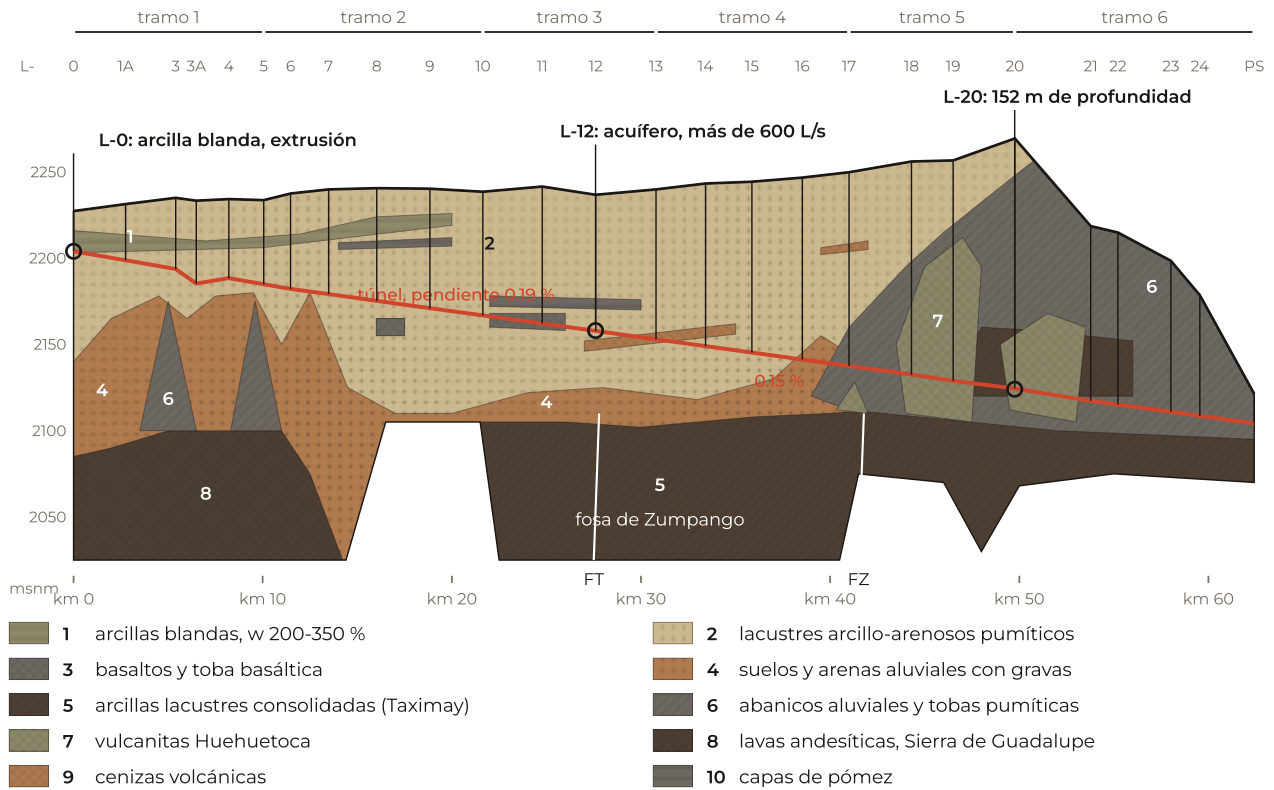
Figura 16. Perfil geológico del túnel L-20 a L-19



Figura 17. Perfil geológico de la L-20 y del TEO, etapas 5 y 6

Sección geológica general del trazo

de la L-0 al portal de salida; exageración vertical de unas 90 veces



Redibujado de Gutiérrez Morales (2013, p. 31, fig. 1-4); terreno, plantilla y lumbreras con datos de De Nova y Luna (2014). Contactos aproximados.

Figura 18. Perfil geológico general del TEO de la L-0 al portal de salida

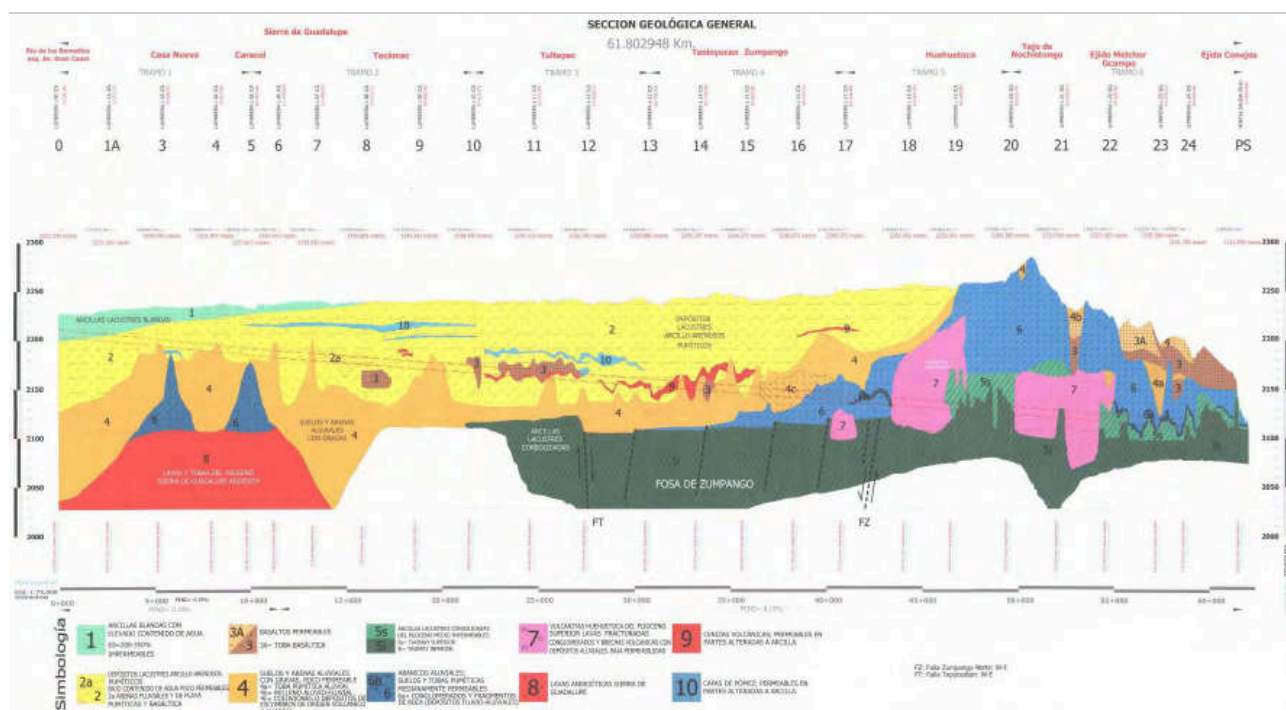


Figura 19. Perfil geológico de la L-17 al portal de salida con sus lumbreras

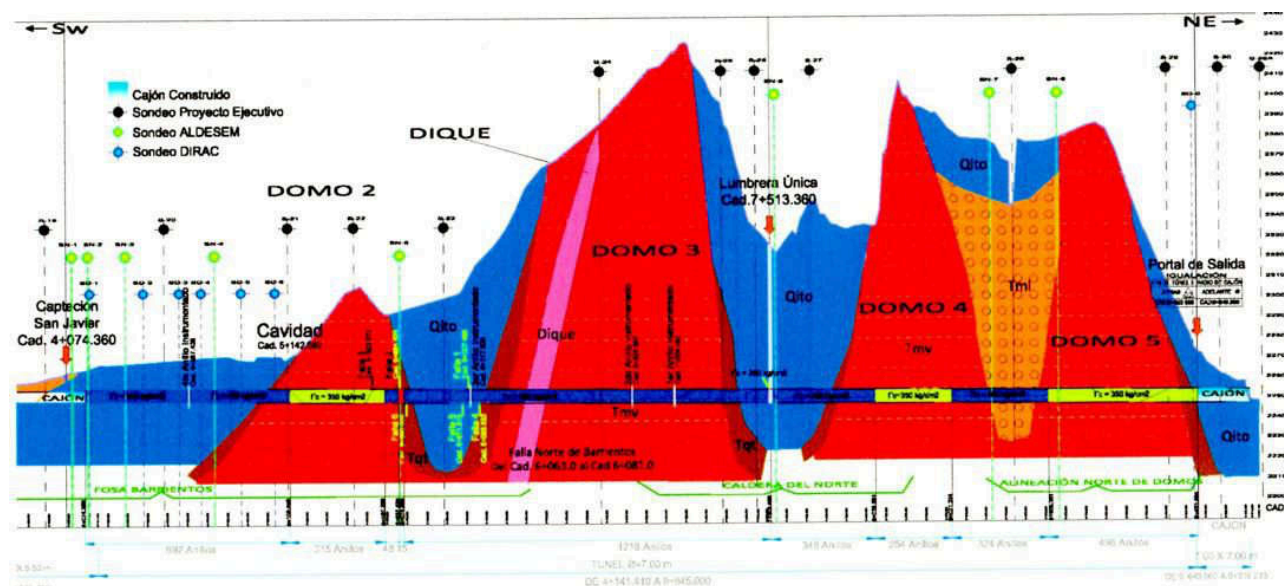


Figura 20. Perfil geológico del TEP II con domos, lahares y diques

SECCIONES

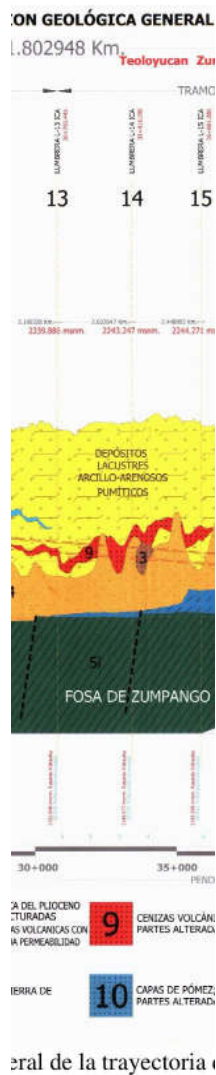


Figura 21. Sección geológica general de la trayectoria del TEO

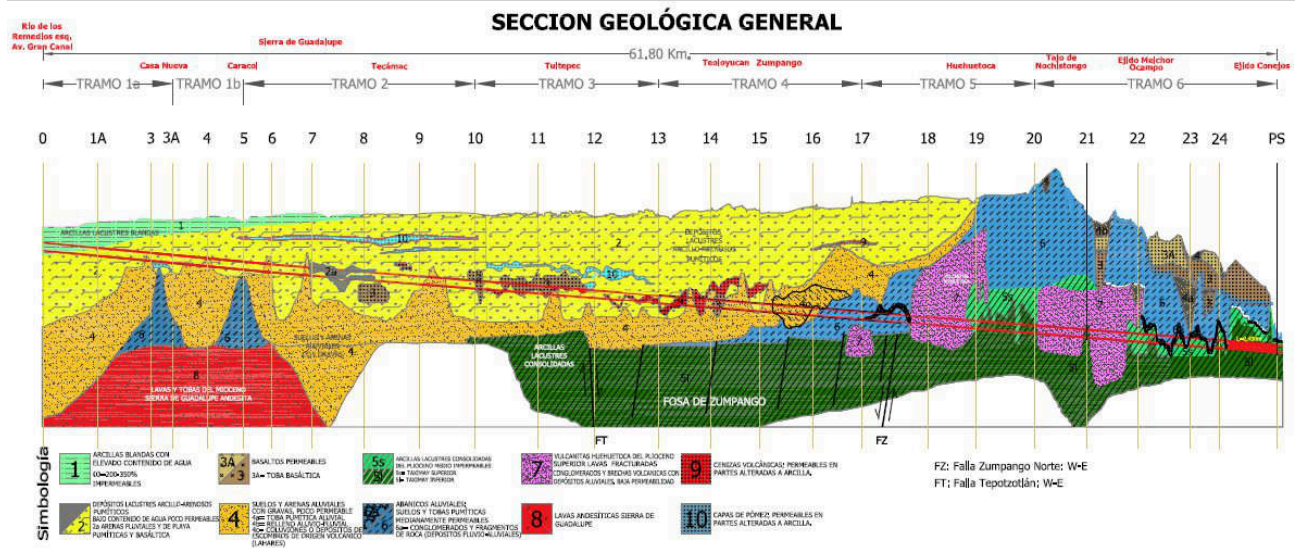


Figura 22. Sección geológica general del TEO, de la lumbrera L-0 al portal

MAPAS

is Geotécnico para la construcción de un túnel en la zona lacustre de la
a del Valle de México

Capítulo
1

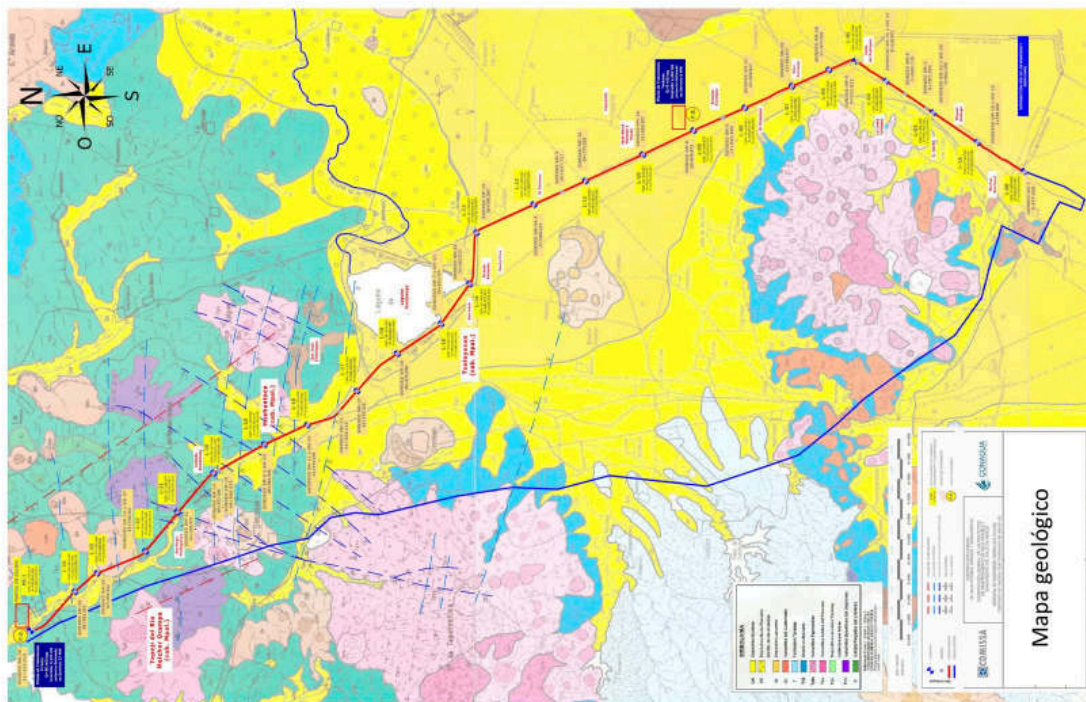


Figura 1-1 . Mapa geológico, donde se muestra en planta la trayectoria del túnel (CONAGUA, 2009)

Figura 23. Mapa geológico con la trayectoria del túnel en planta

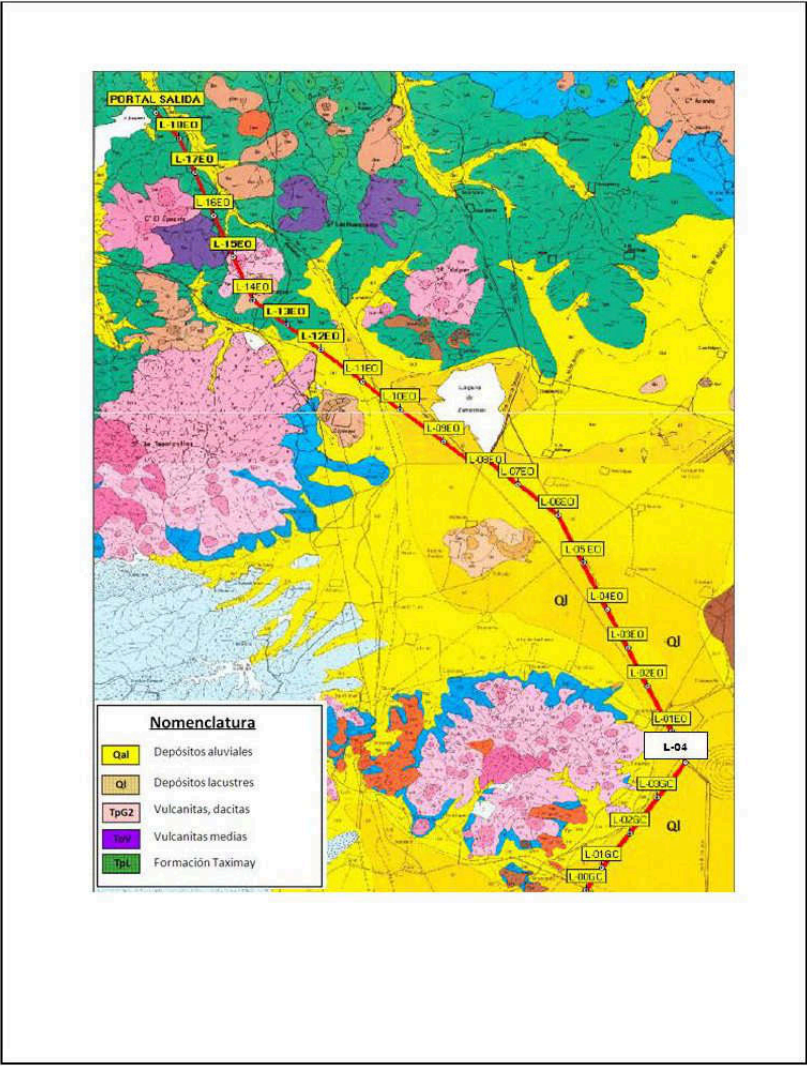


Figura 24. Mapa geológico con la interpretación del Dr



Figura 25. Mapa de ubicación de la lumbrera L-04 respecto a la Sierra de Guadalupe

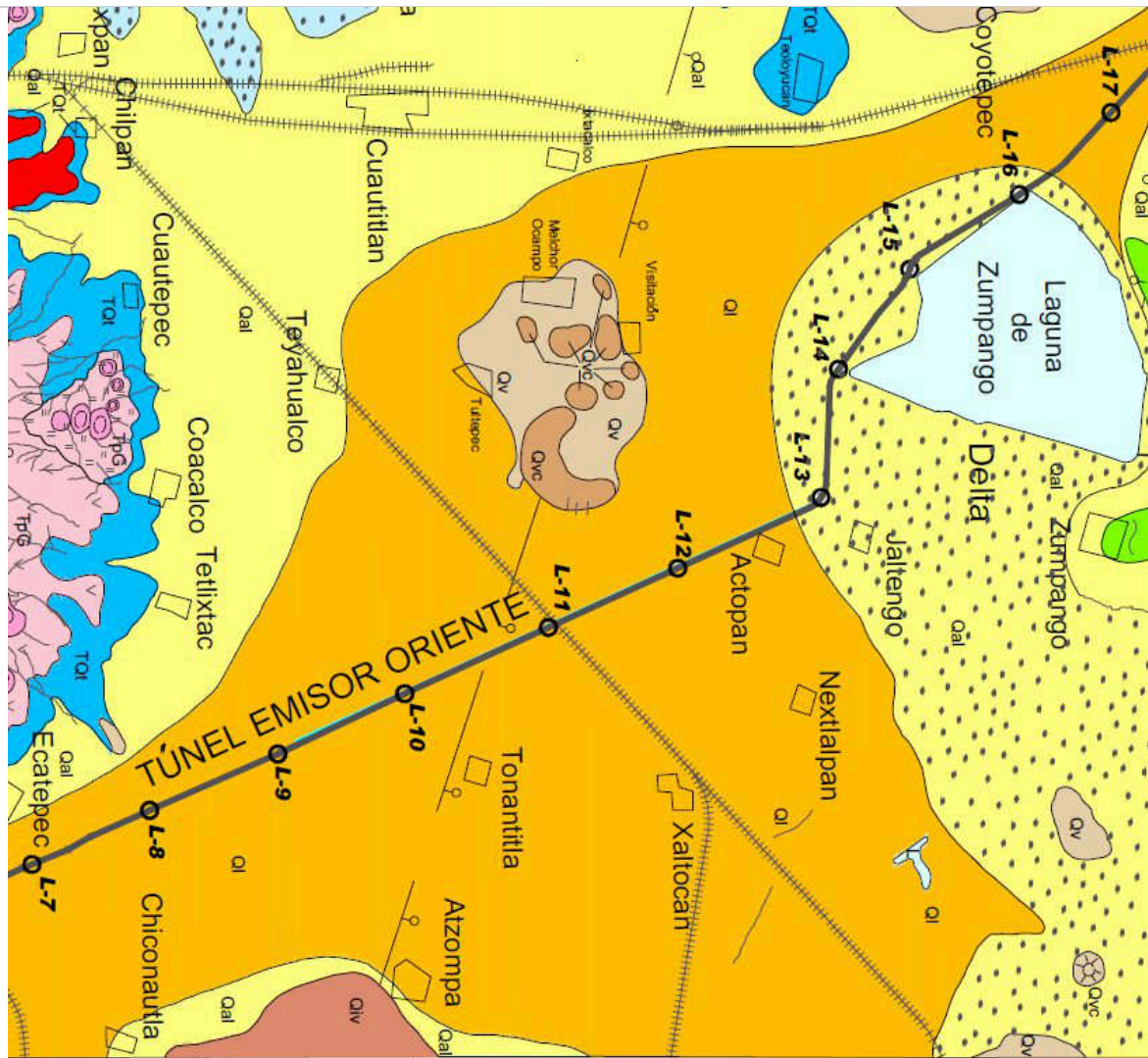


Figura 26. Mapa geológico regional de la zona de la lumbrera L-12

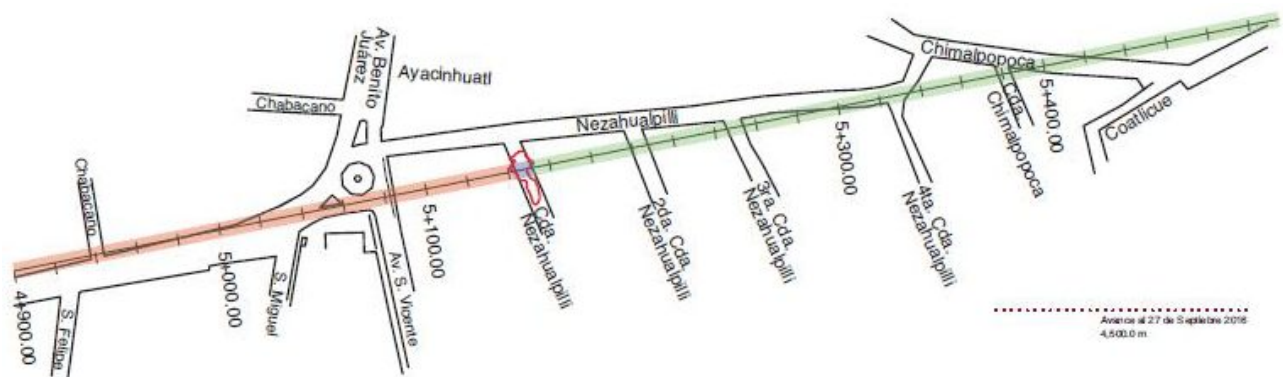


Figura 27. Mapa de localización de la cavidad sobre el eje del TEP II

Estudios geotécnicos

El estudio geotécnico mide las propiedades mecánicas del subsuelo en puntos concretos. Un perfil estratigráfico es una columna o corte que ordena por profundidad los estratos hallados en los sondeos, con su descripción y valores de campo como la penetración estándar; se lee de arriba abajo, del brocal hacia el fondo, y el túnel o la lumbrera se superpone a esas capas. Los registros de sondeo y los ensayos dan el dato de cada capa. En el TEO sirvió para diseñar el muro Milán, el mejoramiento del terreno y la excavación de cada lumbrera y tramo.

PERFILES ESTRATIGRÁFICOS, GEOTÉCNICOS Y LITOLÓGICOS

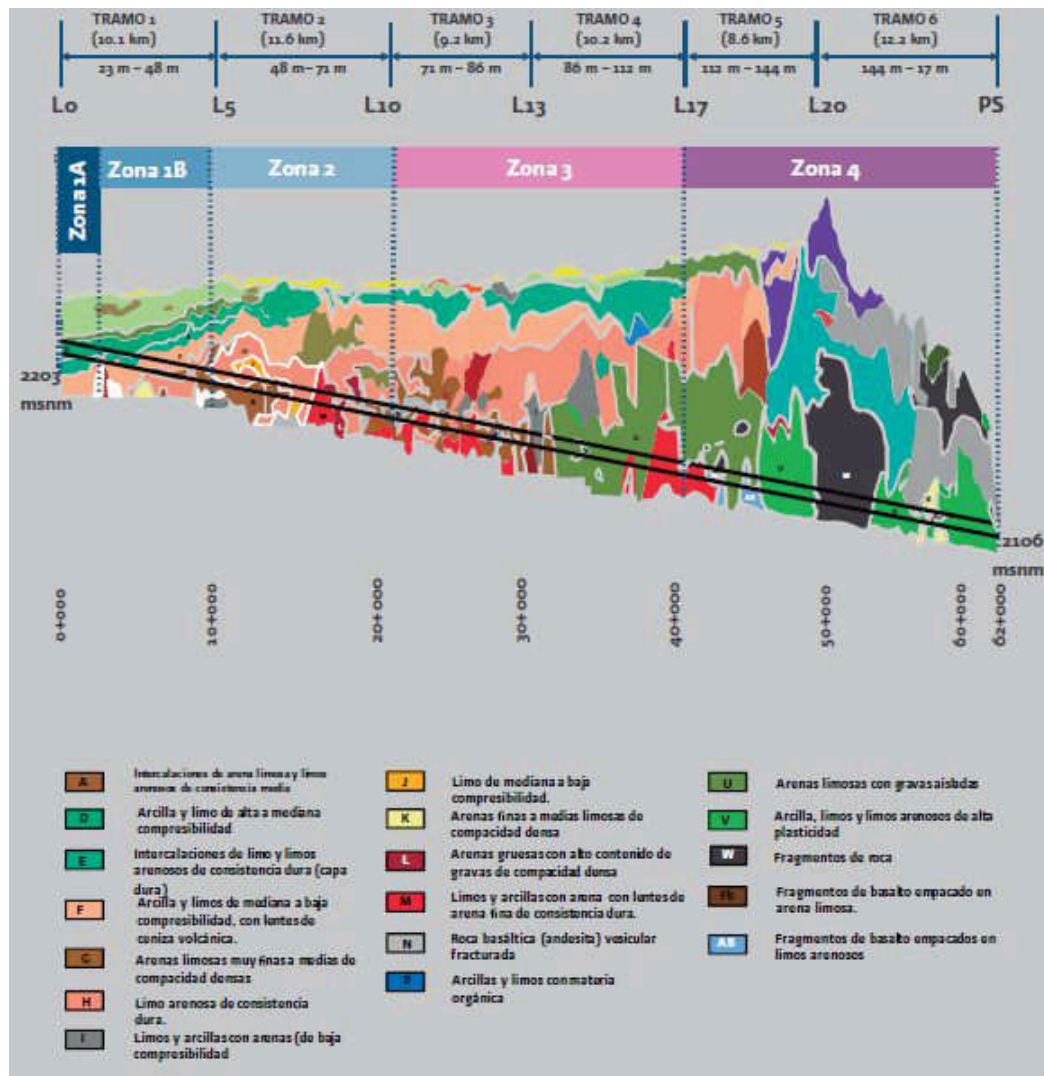


Figura 28. Perfil longitudinal geotécnico del TEO por tramos y zonas geotécnicas

Para calcular las presiones frontales (P) de la cámara del escudo, se emplearon tres metodologías: A) Teorema de frontera, B) Criterio a partir de los empujes activos y C) Criterio observacional resultado de un caso real.

El objetivo de utilizar tres metodologías para evaluar las presiones frontales, obedece a tener un punto de comparación entre los resultados obtenidos, lo cual permitirá realizar una comprobación de los resultados.

Figura 29. Perfil estratigráfico simplificado de la zona de la L-00

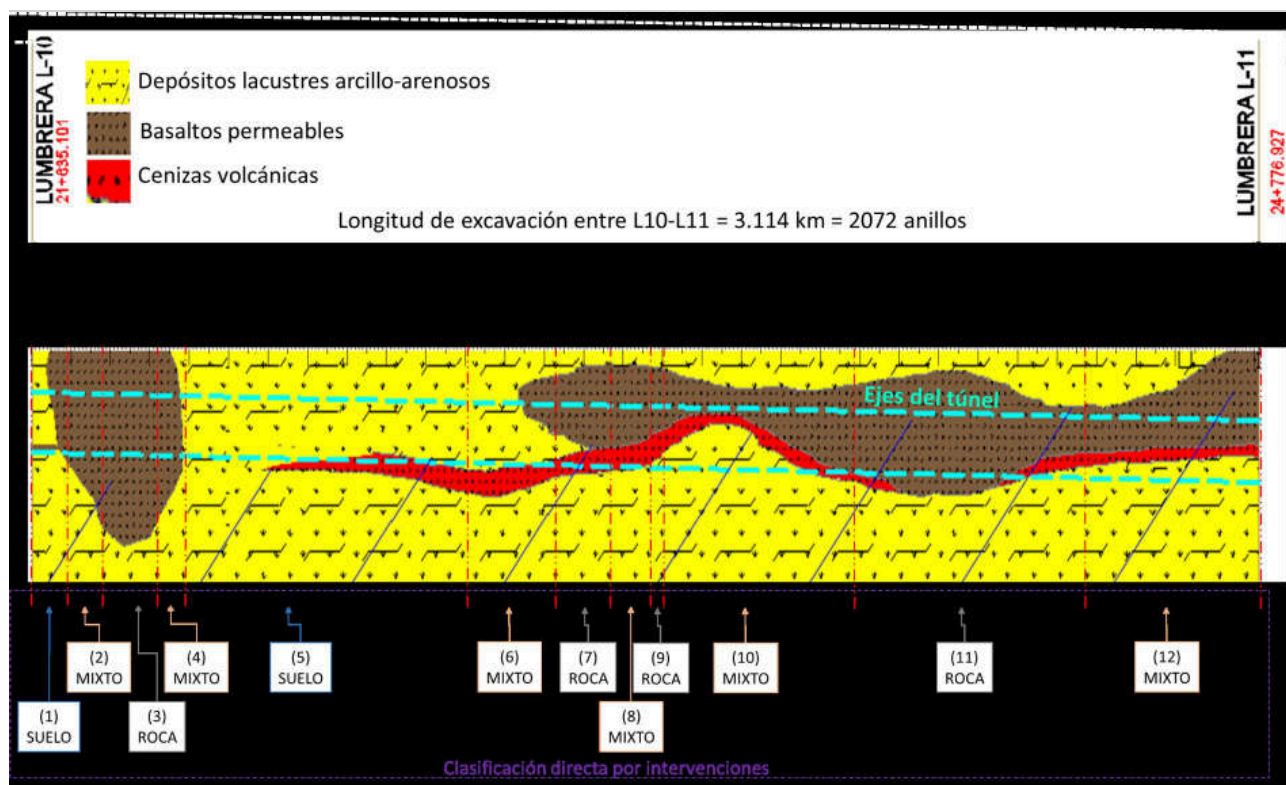


Figura 30. Perfil estratigráfico del subtramo L10-L11

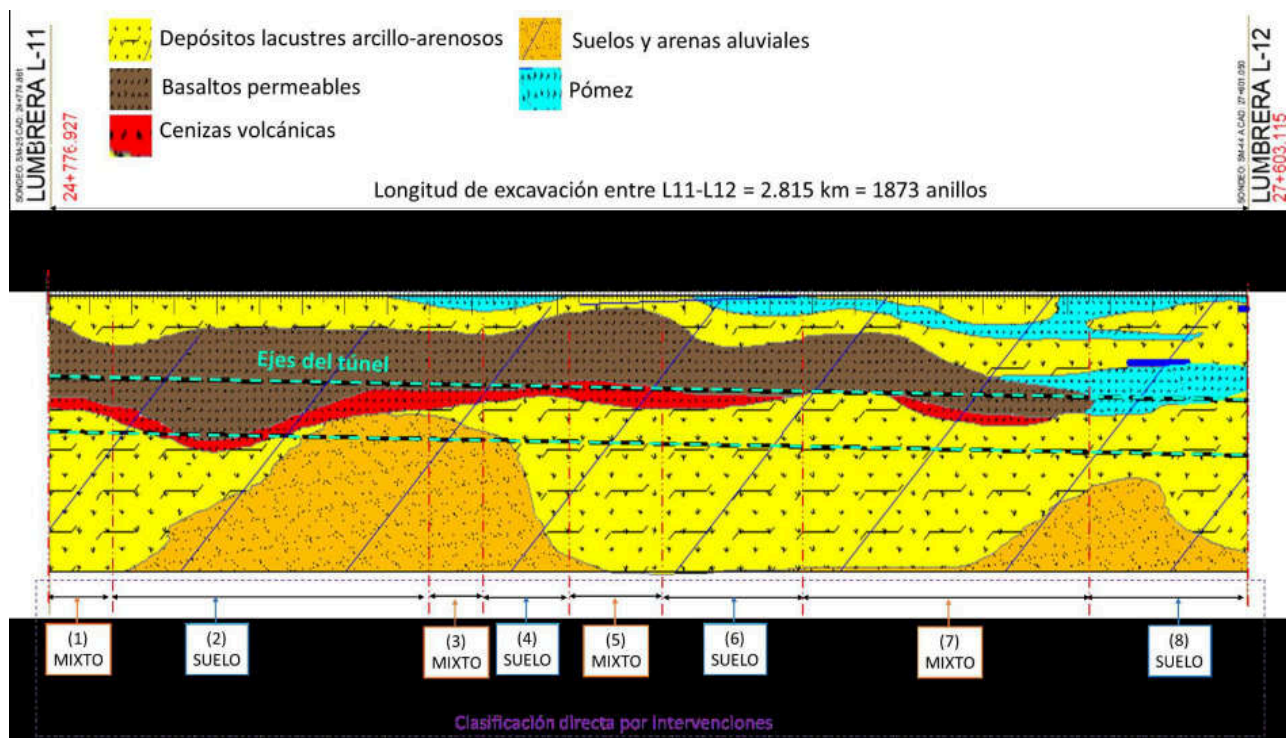


Figura 31. Perfil estratigráfico del subtramo L11-L12

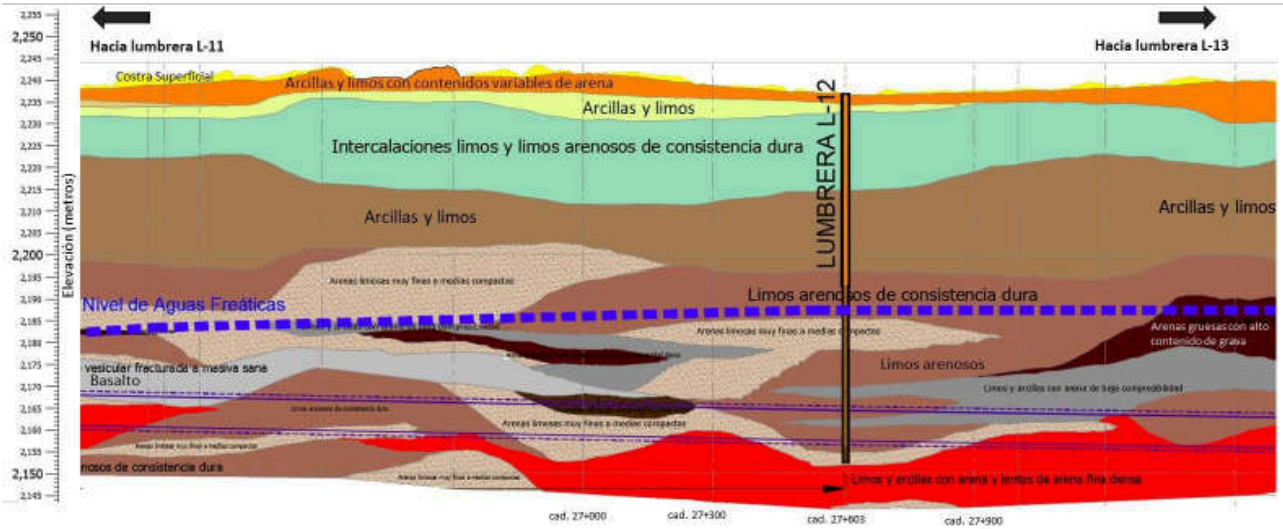


Figura 32. Perfil geotécnico a detalle de la lumbrera L-12 y su entorno

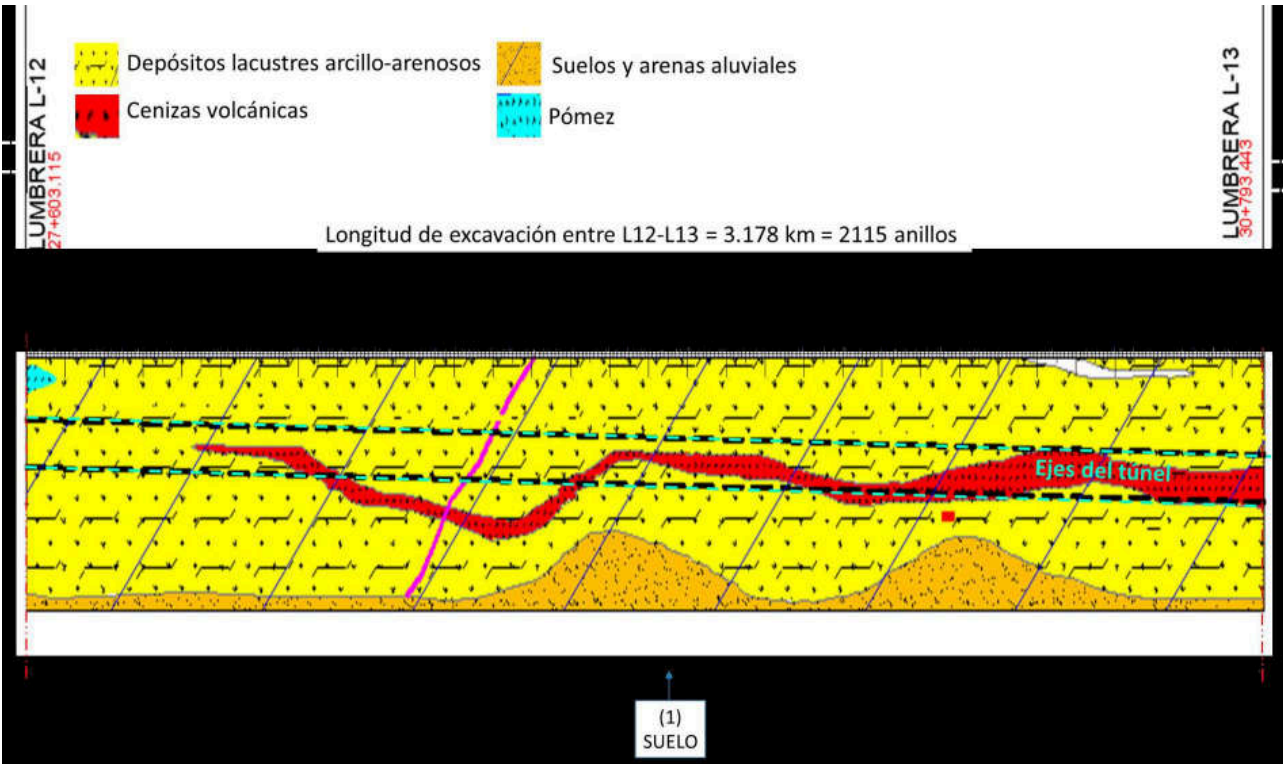


Figura 33. Perfil estratigráfico del subtramo L12-L13

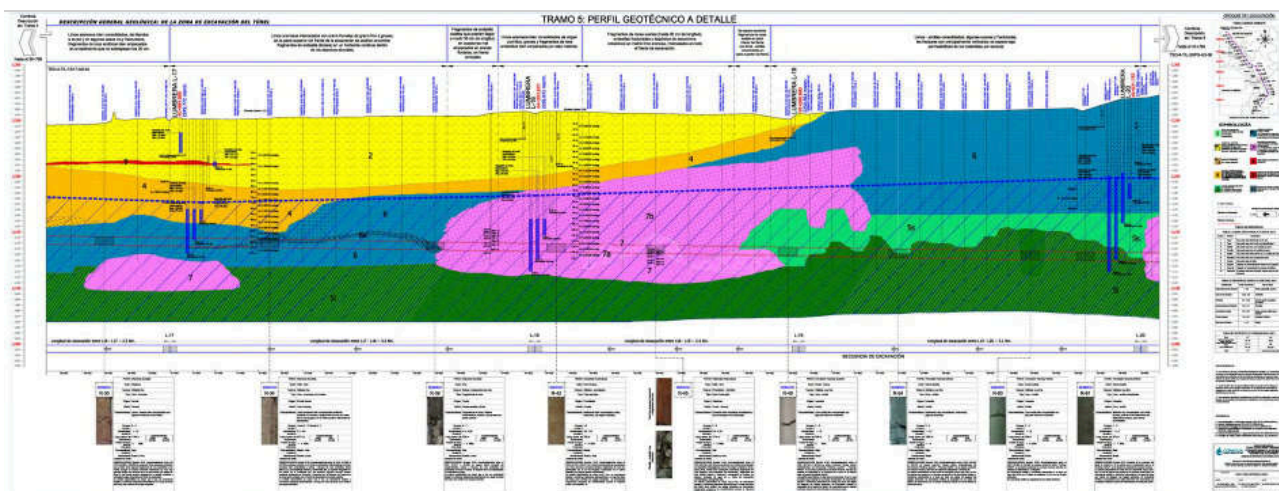


Figura 34. Perfil geotécnico a detalle del tramo V

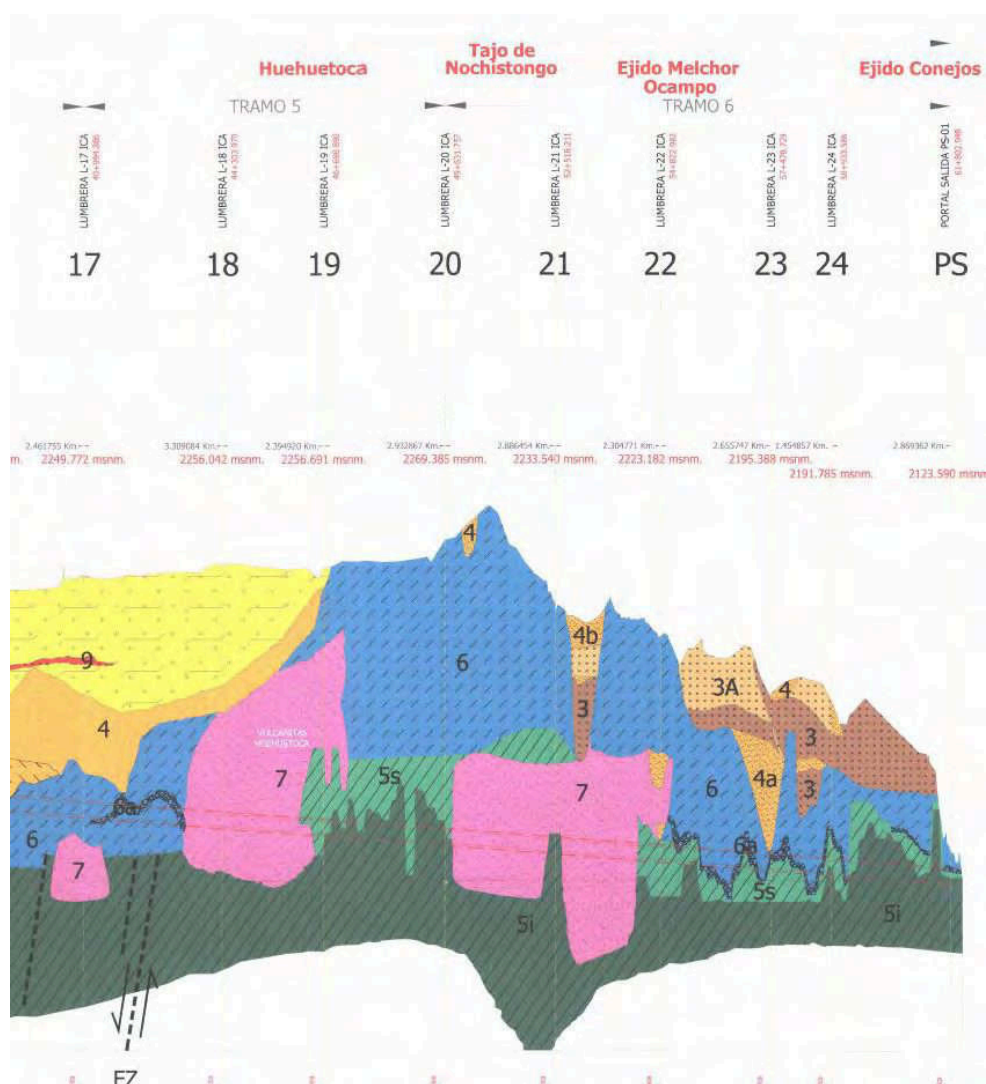


Figura 35. Perfil geotécnico del tramo 05 del TEO

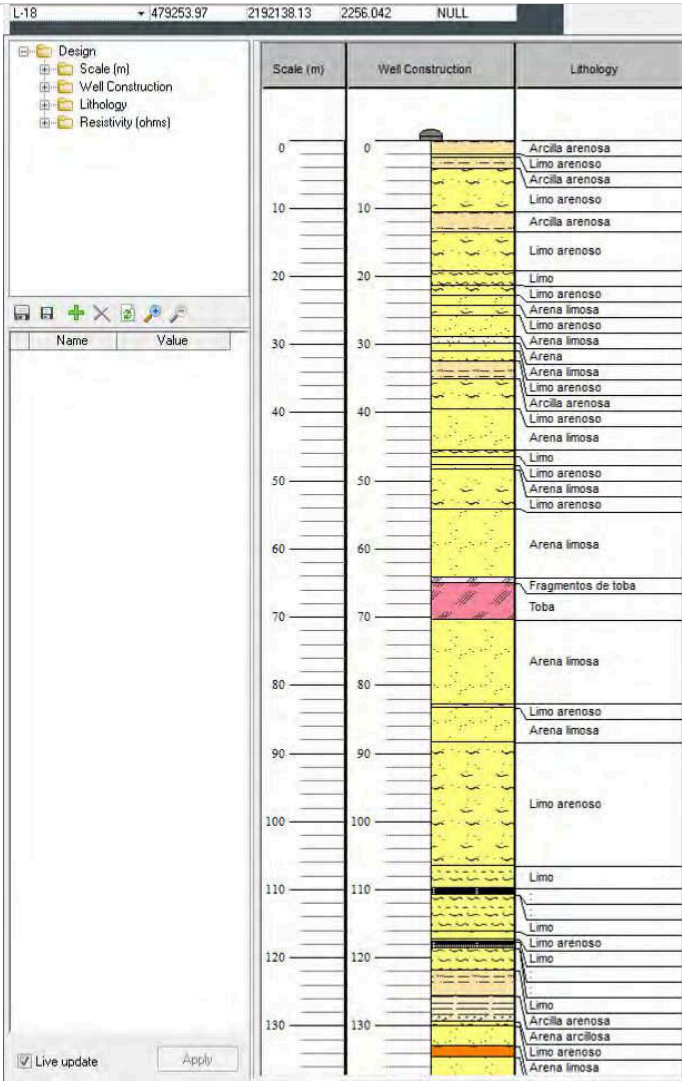


Figura 36. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-18

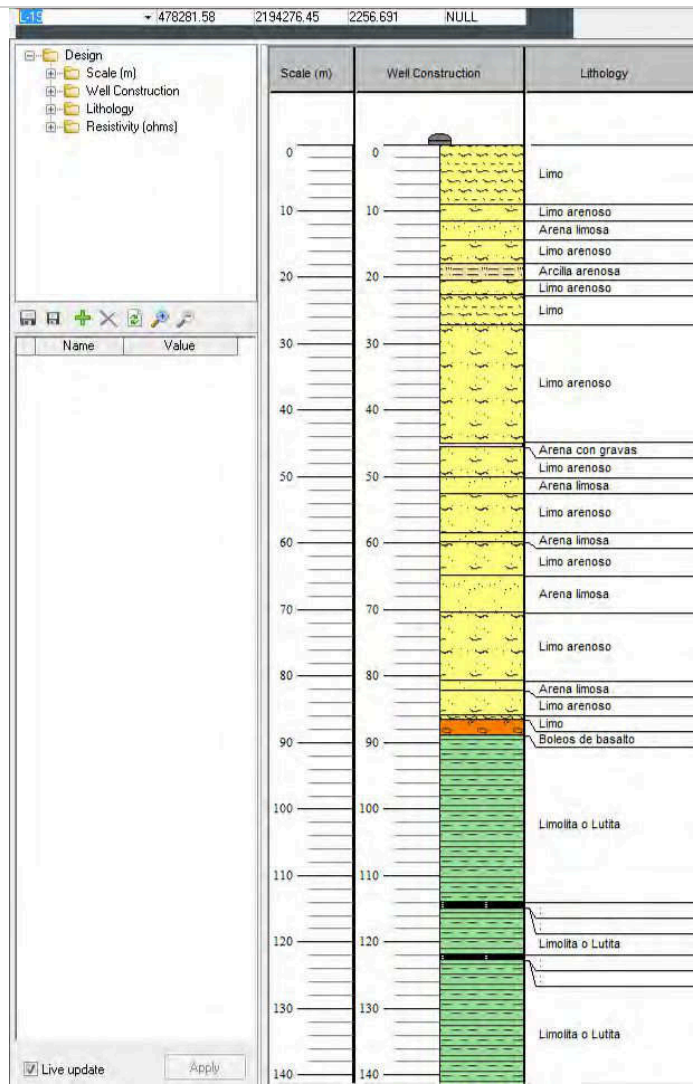


Figura 37. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-19

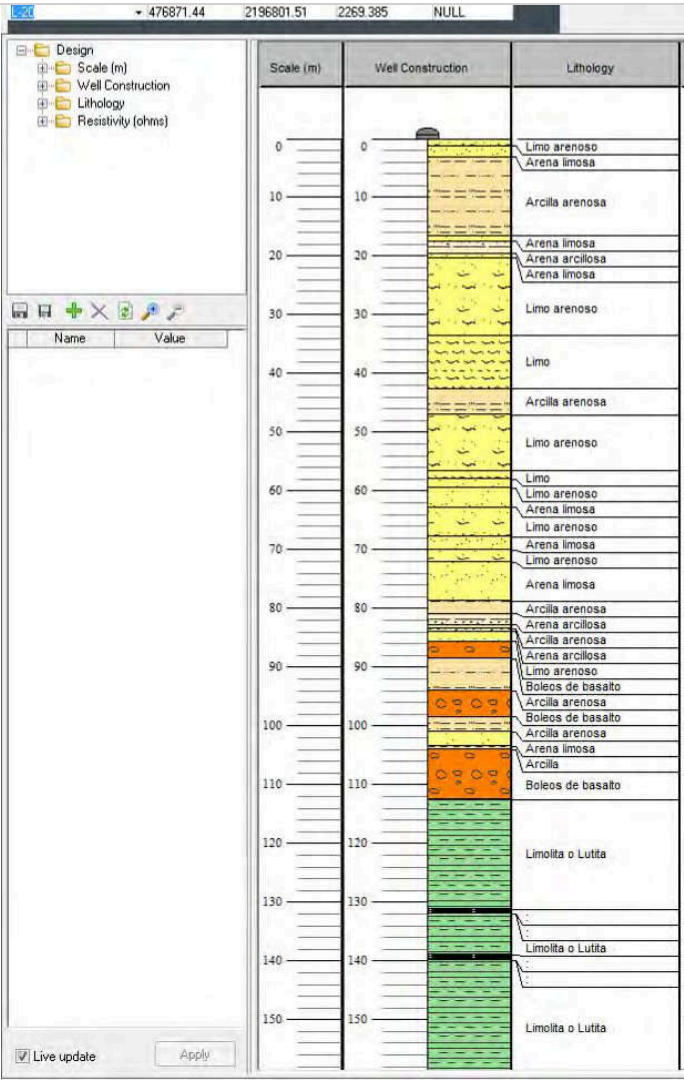


Figura 38. Perfil litológico del suelo de la lumbrera L-20



CAPÍTULO 4 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

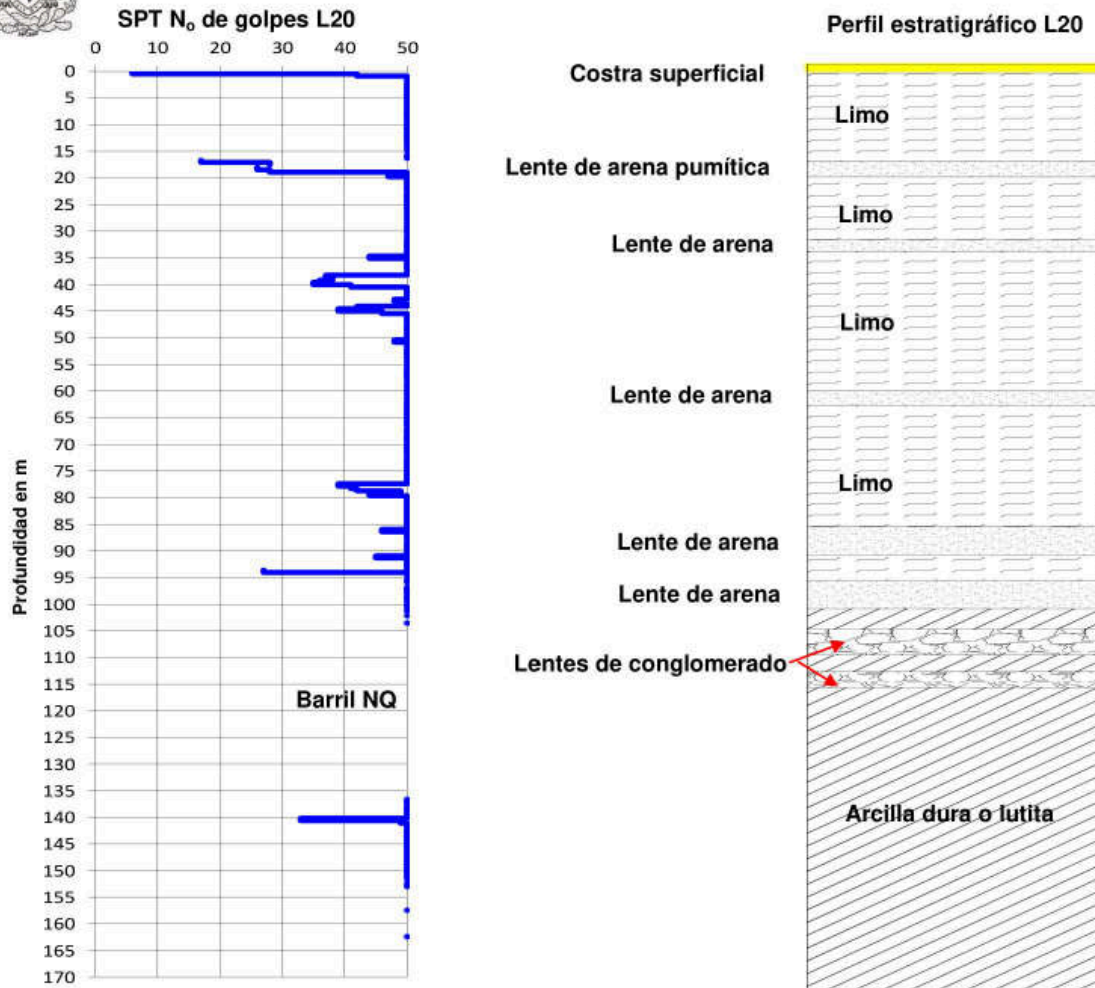


Figura 39. Perfil estratigráfico de la lumbrera L-20 con penetración estándar

Figure 2 presents the geotechnical conditions encountered at the site; a summarized description of the main stratigraphic units is included as follows.

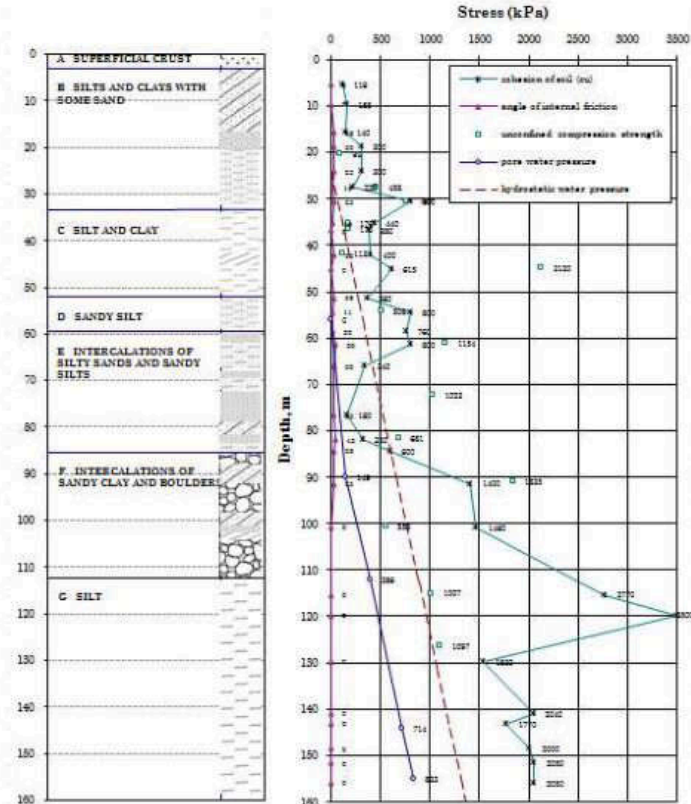


Figure 2. Geotechnical conditions at the site

(A) Superficial Crust. From 0 to 3.10 m in depth; it is

Figura 40. Perfil estratigráfico y geotécnico de la L-20 hasta 158.5 m

SECCIONES

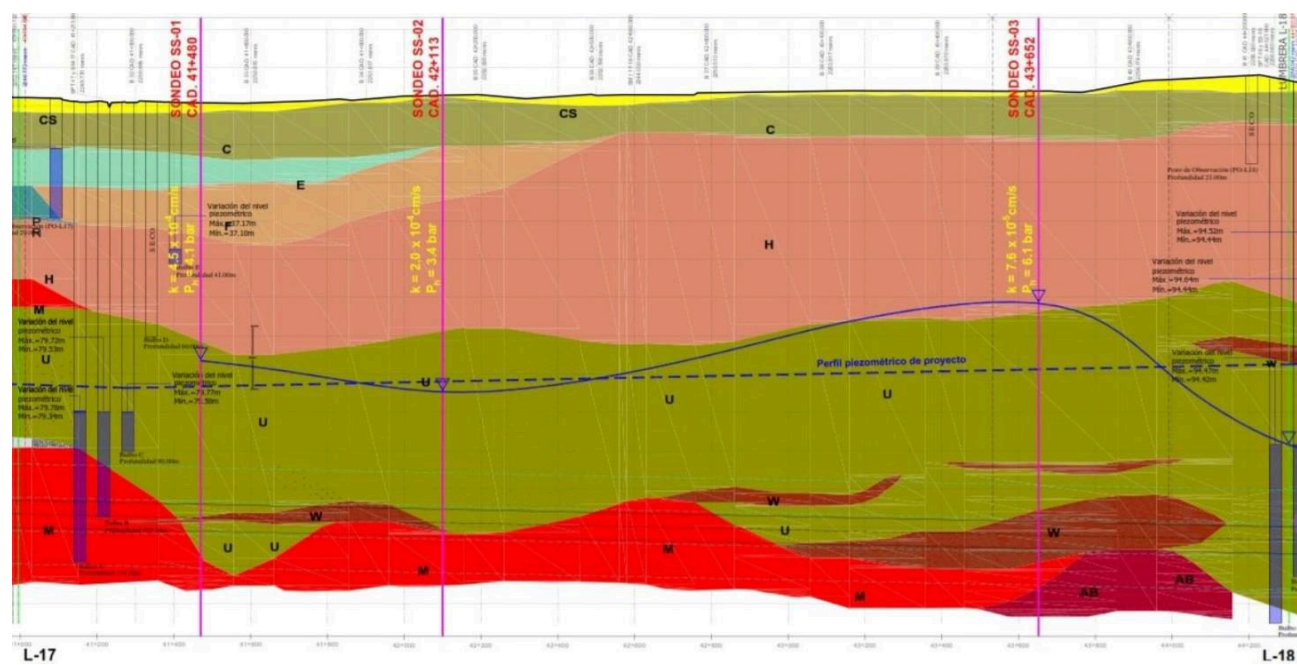


Figura 41. Sección geotécnica del tramo 5

PLANTAS

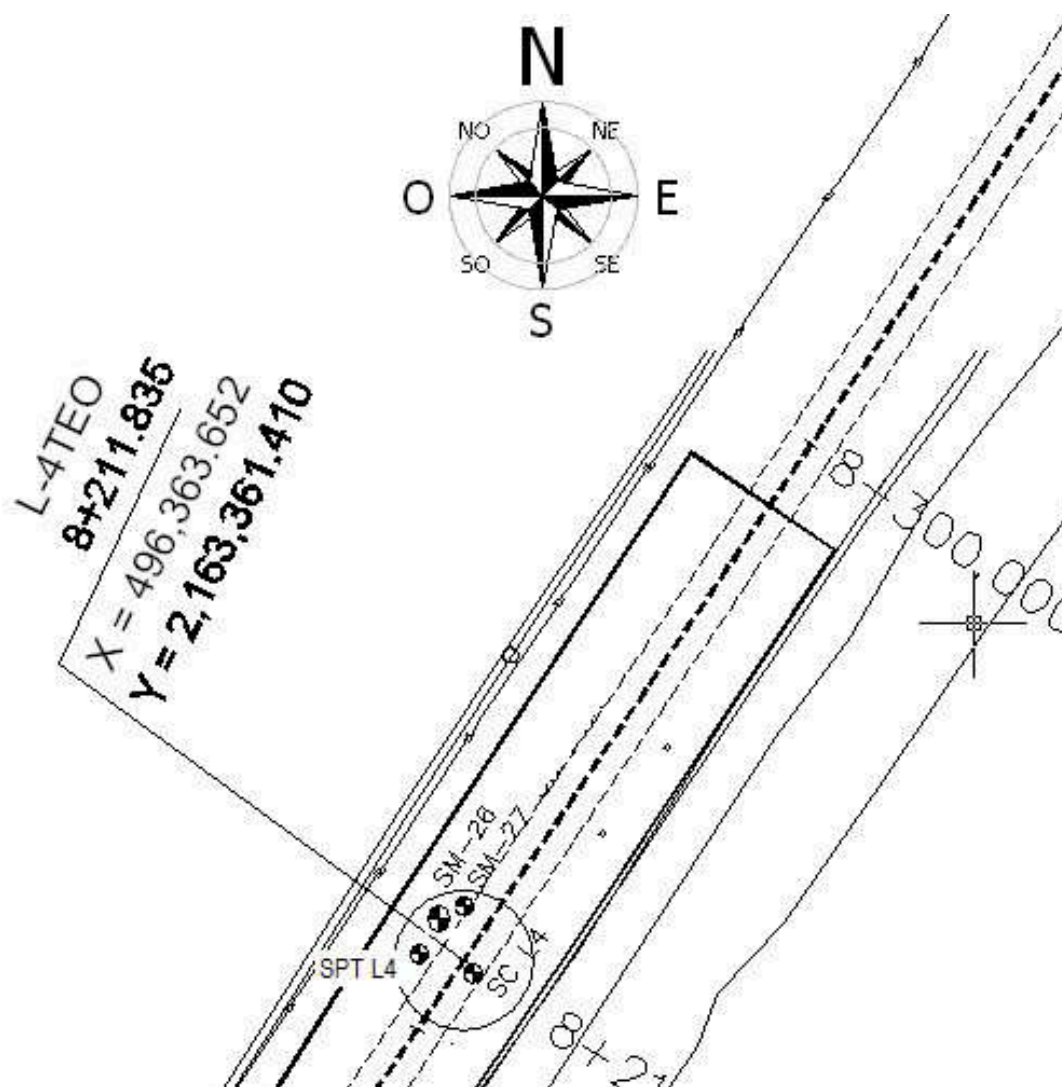


Figura 42. Planta de ubicación de los sondeos en la lumbrera L-04

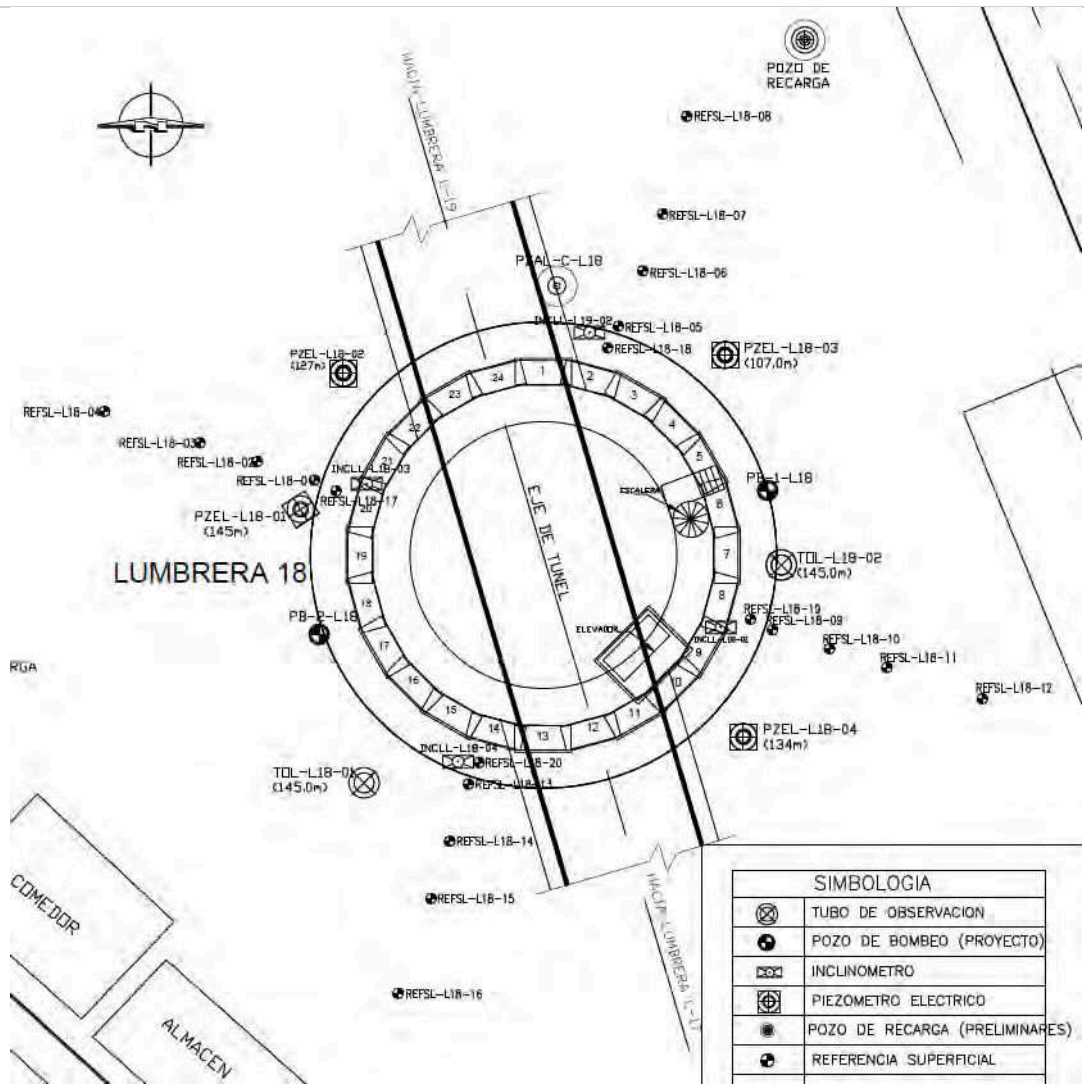


Figura 43. Planta de instrumentación geotécnica de la lumbrera L-18

REGISTROS Y ENSAYES

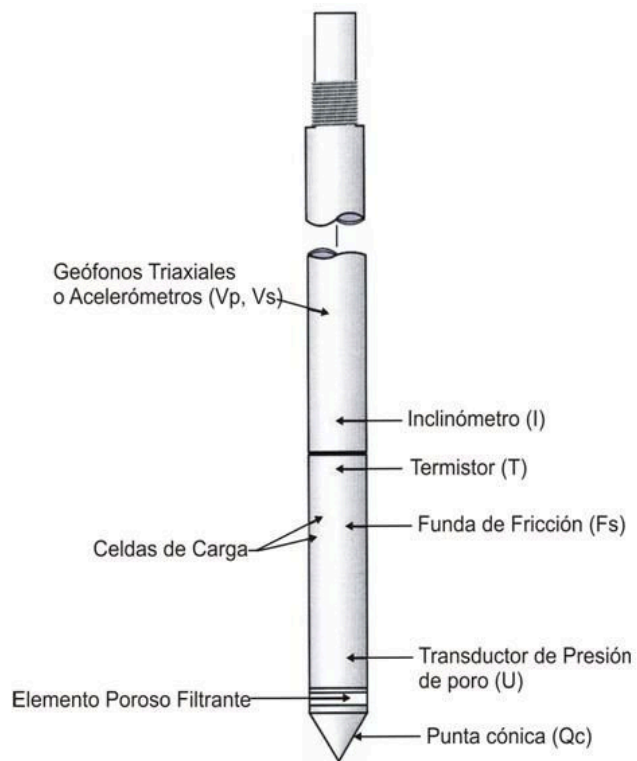


Figura 44. Equipos de piezocono y conos eléctricos usados en la exploración de lumbreras

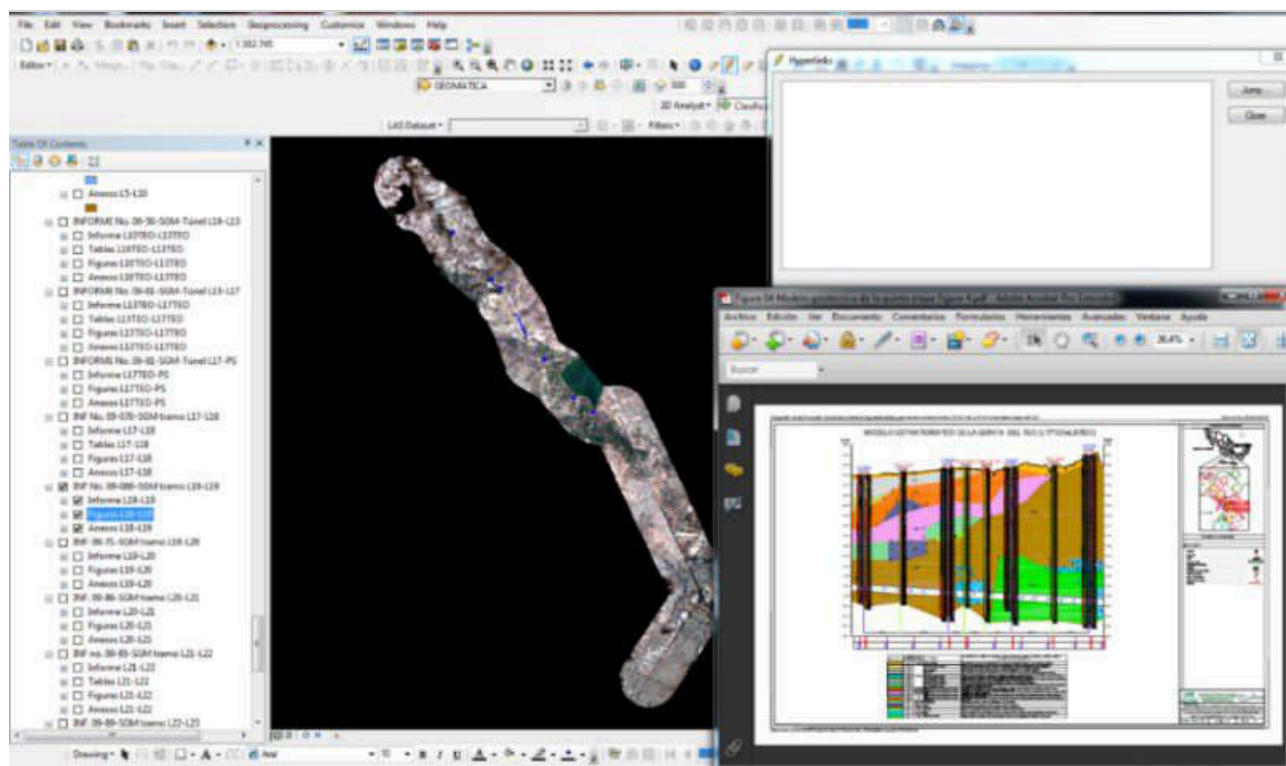


Figura 45. Registro de informes geotécnicos por tramo en el SIGTEO

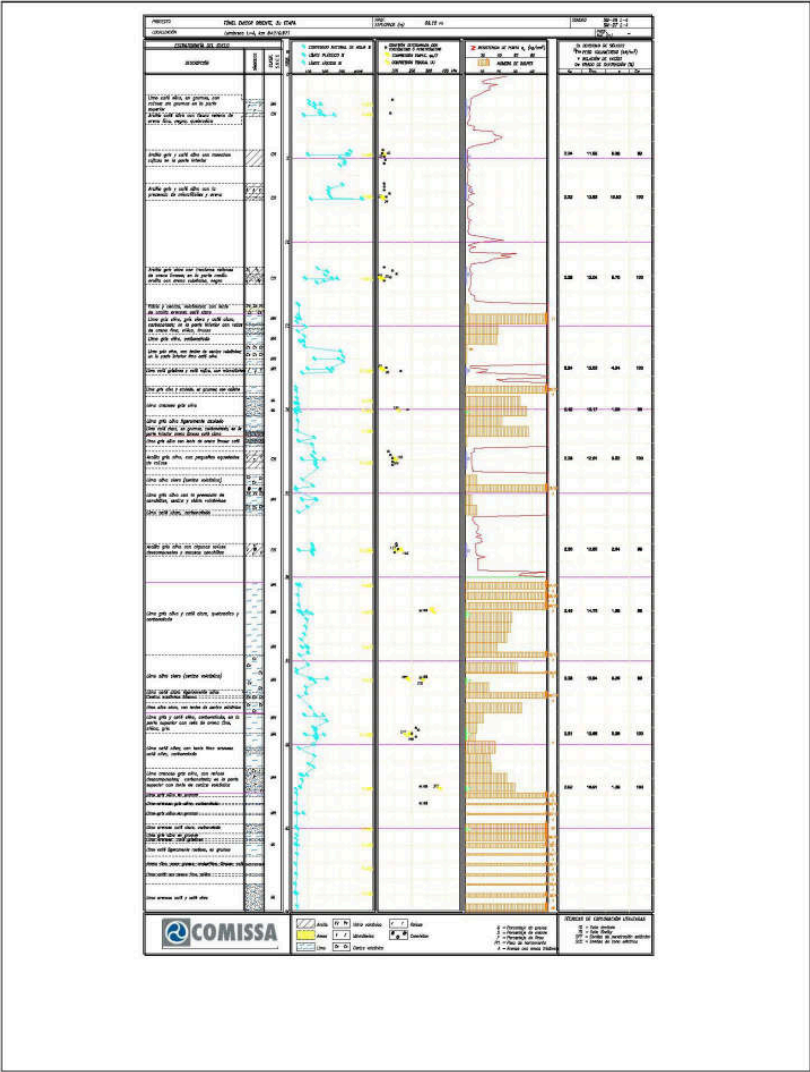


Figura 46. Registro de los sondeos SM-26 y SM-27 en L-04, primera parte



siguiente figura (se indican las profundidades de instalación de cada instrumento).

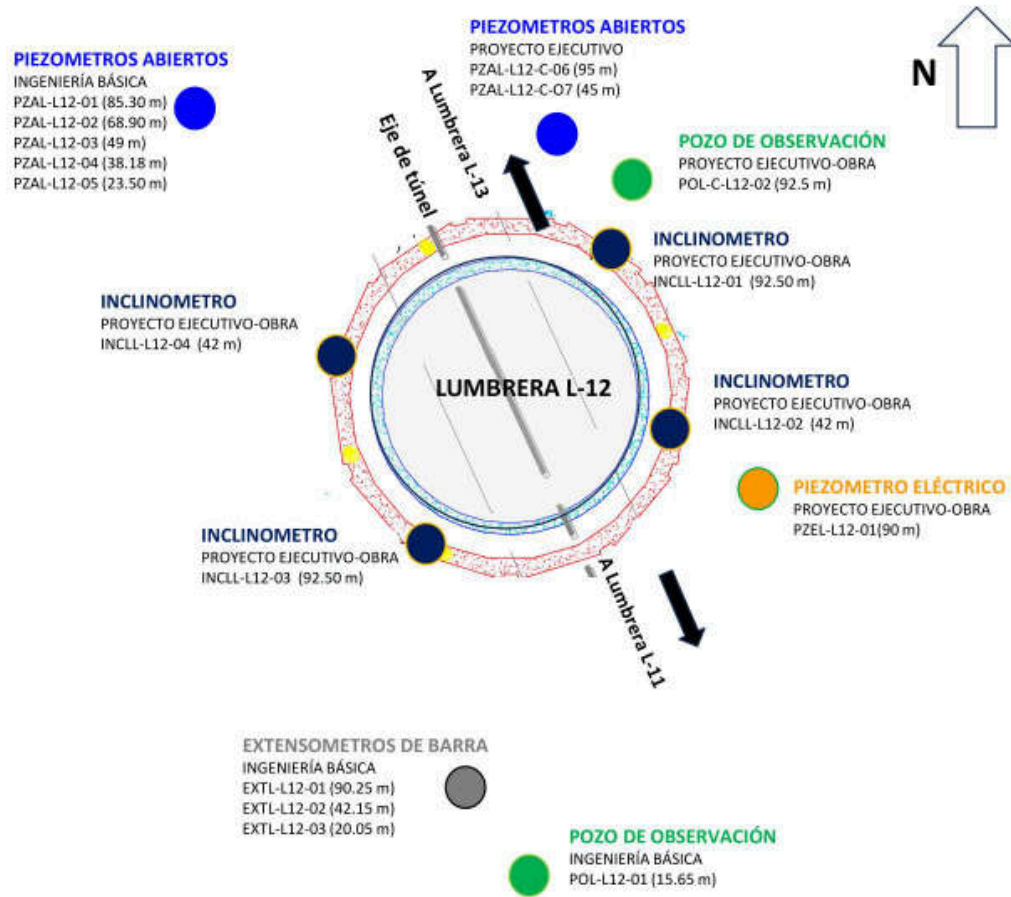


Figura 29.- Sembrado de instrumentación utilizada para la lumbrera L-12 (Fuente: CONAGUA-CFE-COMISSA).

Figura 48. Registro de la instrumentación geotécnica instalada en la lumbrera L-12



Figura 49. Registro de sondeos de ingeniería básica y proyecto ejecutivo en la lumbrera L-12

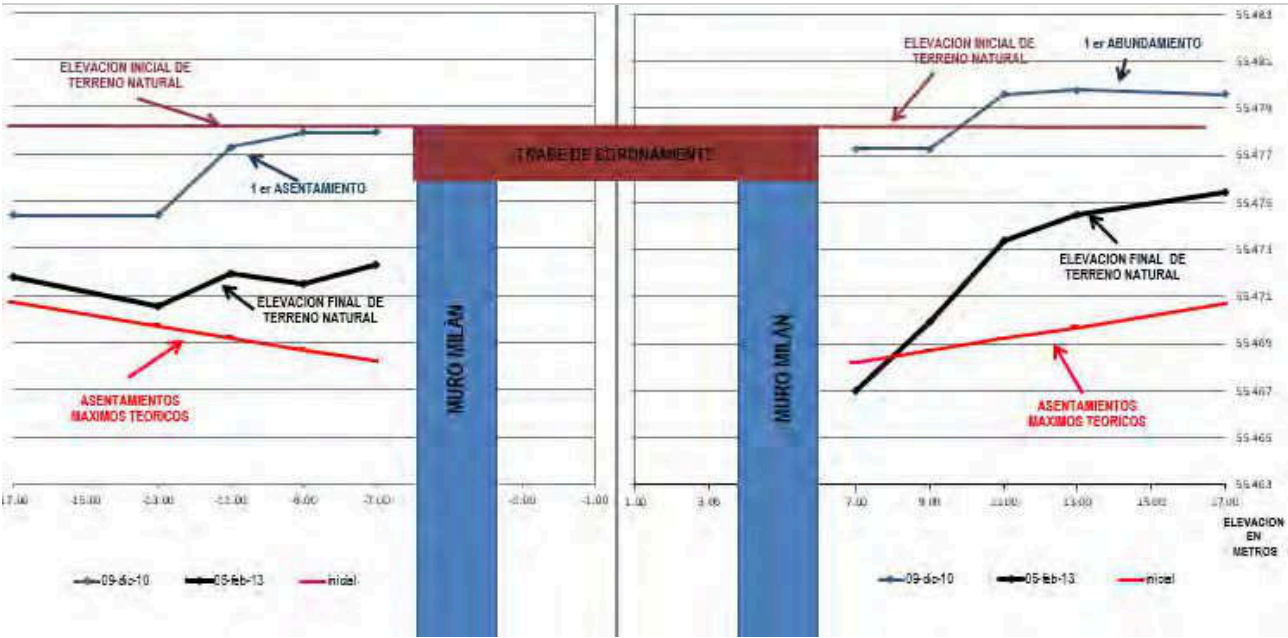


Figura 50. Registro de asentamientos teóricos y medidos en la lumbrera L-18

6.2.2) Inclínómetros

Los Inclínómetros verticales instalados en la periferia de una Lumbrera nos permiten conocer los movimientos y desplazamientos que pudiesen presentar durante las distintas etapas de construcción y/o después de presentarse fenómenos naturales como los sismos y así determinar si existe algún indicio de algún tipo de mecanismo de falla del suelo o de la estructura y con ello poder tomar las medidas preventivas y/o correctivas necesarias. Para ejemplificar las mediciones de Inclínómetros más representativas se utilizaron dos casos de la Lumbrera L-20, esto nos permitió conocer los desplazamientos del muro Milán y suelo natural durante el proceso constructivo de la Lumbrera; además estos datos se pudieron cotejar con los desplazamientos esperados de acuerdo a proyecto (ver figura 34).

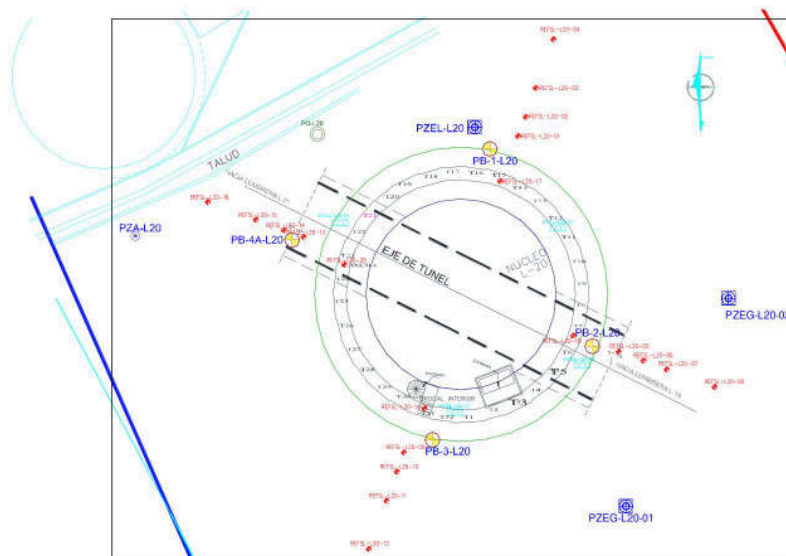


FIGURA 34. Croquis de ubicación de Inclínómetros instalados en la Lumbrera L-20 del TEO.

6.2.2.1) Principales mecanismos de falla para Lumbrera

- 1.- Falla general por cortante en las paredes de la excavación (se generan desplazamientos horizontales y verticales).
- 2.- Falla local de las paredes de la excavación.
- 3.- Falla por cortante en el fondo.
- 4.- Falla del fondo por subpresión.
- 5.- Falla por flotación (emergimiento de la Lumbrera terminada).

Figura 51. Registro de inclinómetros instalados en la lumbrera L-20

MODELOS Y ESQUEMAS

Modelo Geotécnico Lumbrera 04				5.48	m	NAF		30	kPa	Sobrecarga		
Unidad	Prof. (m)	Prof. media (m)	Espesor (m)	Descripción	SUCS	w(%)	Peso volumétrico, γ (kN/m ³)	Cohesión, c (kPa)	Ángulo de fricción, ϕ (°)	Relación de Poisson, ν	Módulo de Young, E (kPa)	K_0
A	0.00 1.40	0.70	1.40	Costra superficial formada por arcilla limosa, café claro de consistencia muy firme con arena	CL	58	15.00	80.00	10	0.40	8000	0.70
B	1.40 14.30	7.85	12.90	Arcilla de consistencia blanda y alta plasticidad con presencia de materia orgánica	CH	200	12.10	32.80	0	0.40	6850	0.70
C1	14.30 16.30	15.30	2.00	Limo arcilloso de consistencia muy dura con intercalaciones de arcilla de consistencia muy blanda	ML	50	11.80	40.50	0	0.35	10340	0.70
C2	16.30 18.20	17.25	1.90	Arcilla de consistencia muy blanda color gris verdoso, con grumos del mismo material	CH	200	12.80	45.80	0	0.40	3130	0.70
C3	18.20 21.60	19.90	3.40	Limo arenoso gris verdoso de consistencia muy dura y arena volcánica altamente compacta	ML	40	17.00	36.20	34	0.40	18440	0.44
D	21.60 30.30	25.95	8.70	Intercalaciones de limo de consistencia muy firme y arcilla de consistencia blanda a media	CH-ML	130	14.30	113.50	0	0.35	9900	0.70
F1	30.30 38.10	34.20	7.80	Limo arenoso de consistencia dura y arena limosa muy compacta	ML	75	14.00	200.60	6	0.35	20320	0.70
F2	38.10 42.90	40.50	4.80	Arcilla de alta plasticidad de consistencia firme y poco compresible	CH	100	14.10	138.70	9	0.35	20020	0.70
G1	42.90 50.10	46.50	7.20	Intercalaciones de limo y limo arenoso de consistencia muy dura	MH-ML	15	16.40	172.00	0	0.30	23330	0.70
G2	50.10 57.00	53.55	6.90	Limo arenoso cementado de consistencia muy dura	ML	15	18.20	355.50	20	0.30	128340	0.66

Figura 52. Modelo geotécnico de la lumbrera L-04 en forma tabular

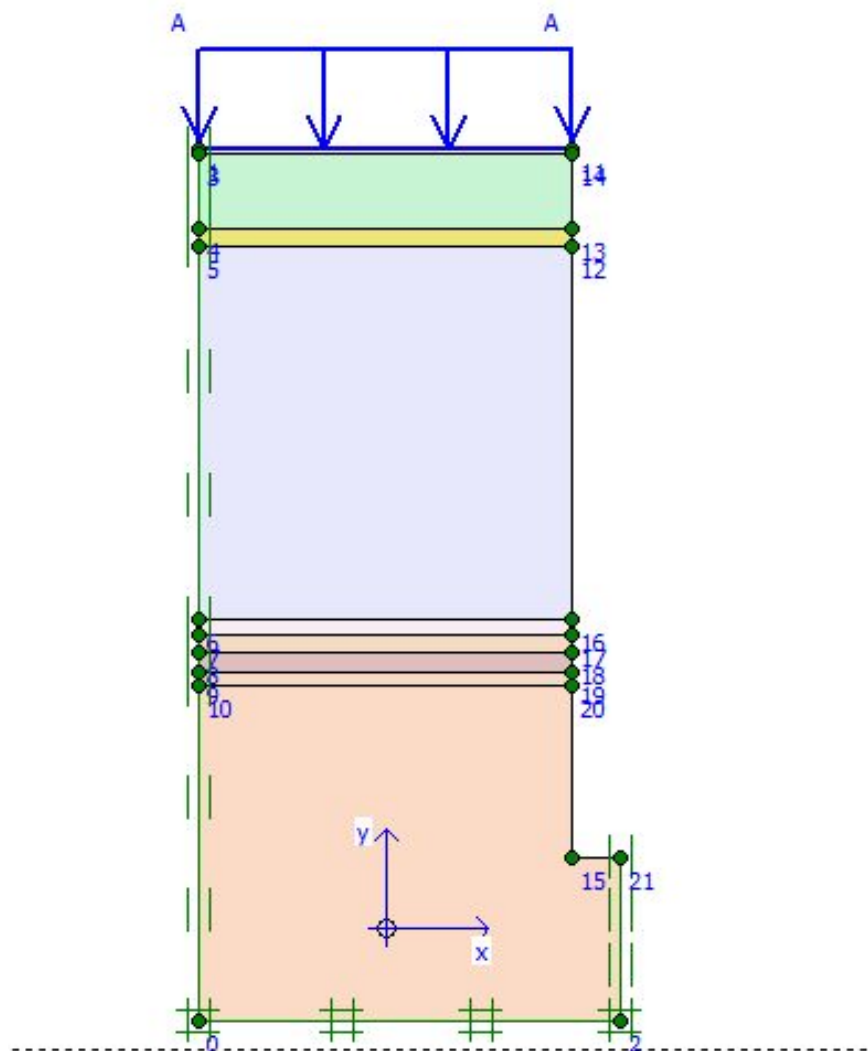


Figura 53. Modelo del corte de la lumbrera L-20

04

Estudios geofísicos

El estudio geofísico explora el subsuelo sin excavarlo, con mediciones indirectas como la resistividad eléctrica o la velocidad de las ondas sísmicas. Un sondeo eléctrico vertical da la resistividad por profundidad, y el cross-

hole mide la velocidad de onda de corte entre barrenos; se leen como curvas que cambian donde cambia el material. En el TEO complementó los sondeos mecánicos, sobre todo en las lumbreras, para caracterizar las capas y su rigidez.

REGISTROS Y ENSAYES

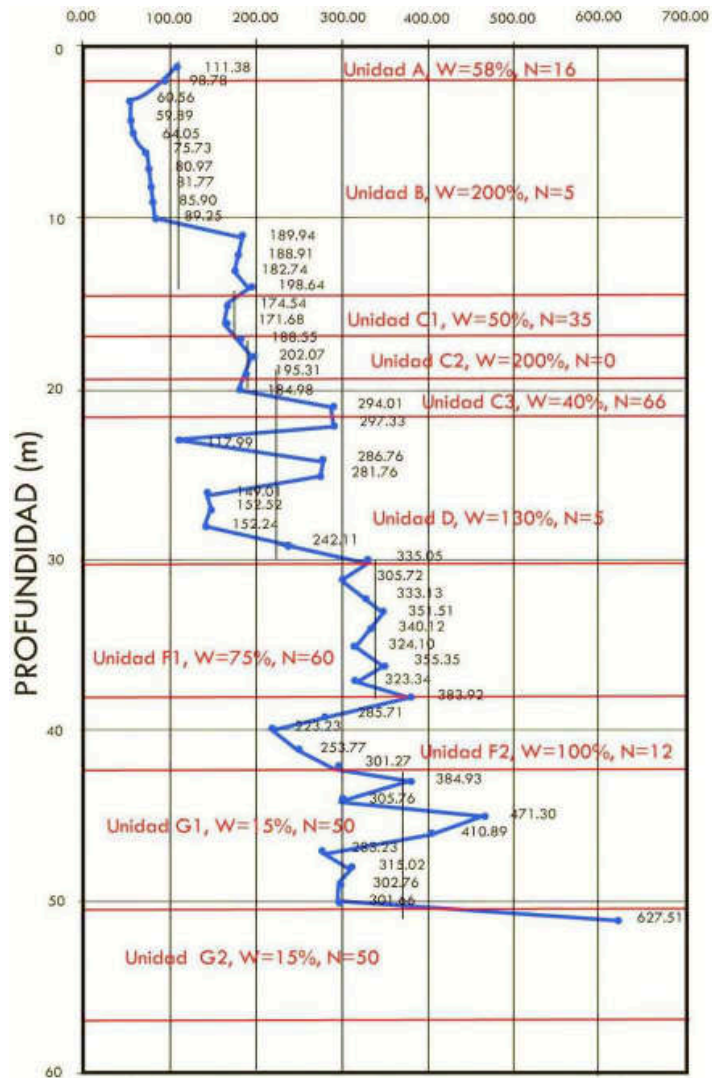


Figura 54. Registro de velocidades de onda de corte en la L-04 por cross-hole

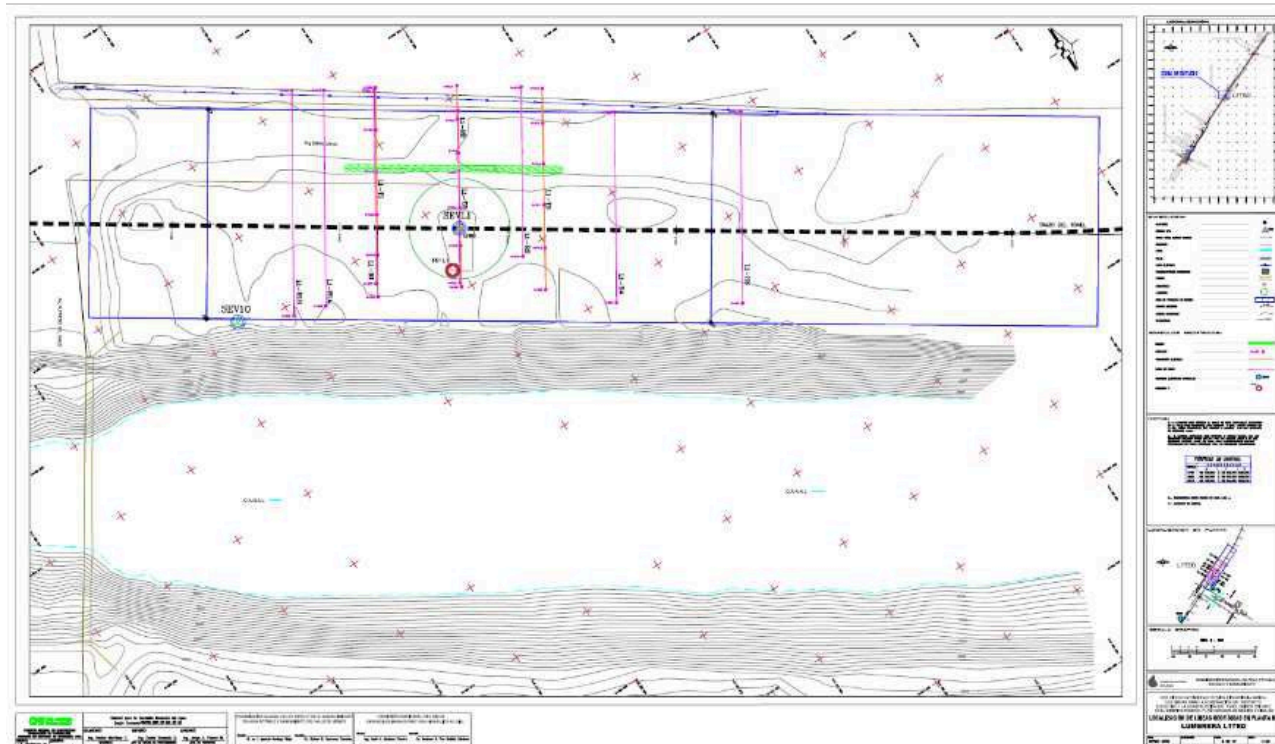


Figura 55. Registro geofísico del pozo de observación en la lumbrera L-4

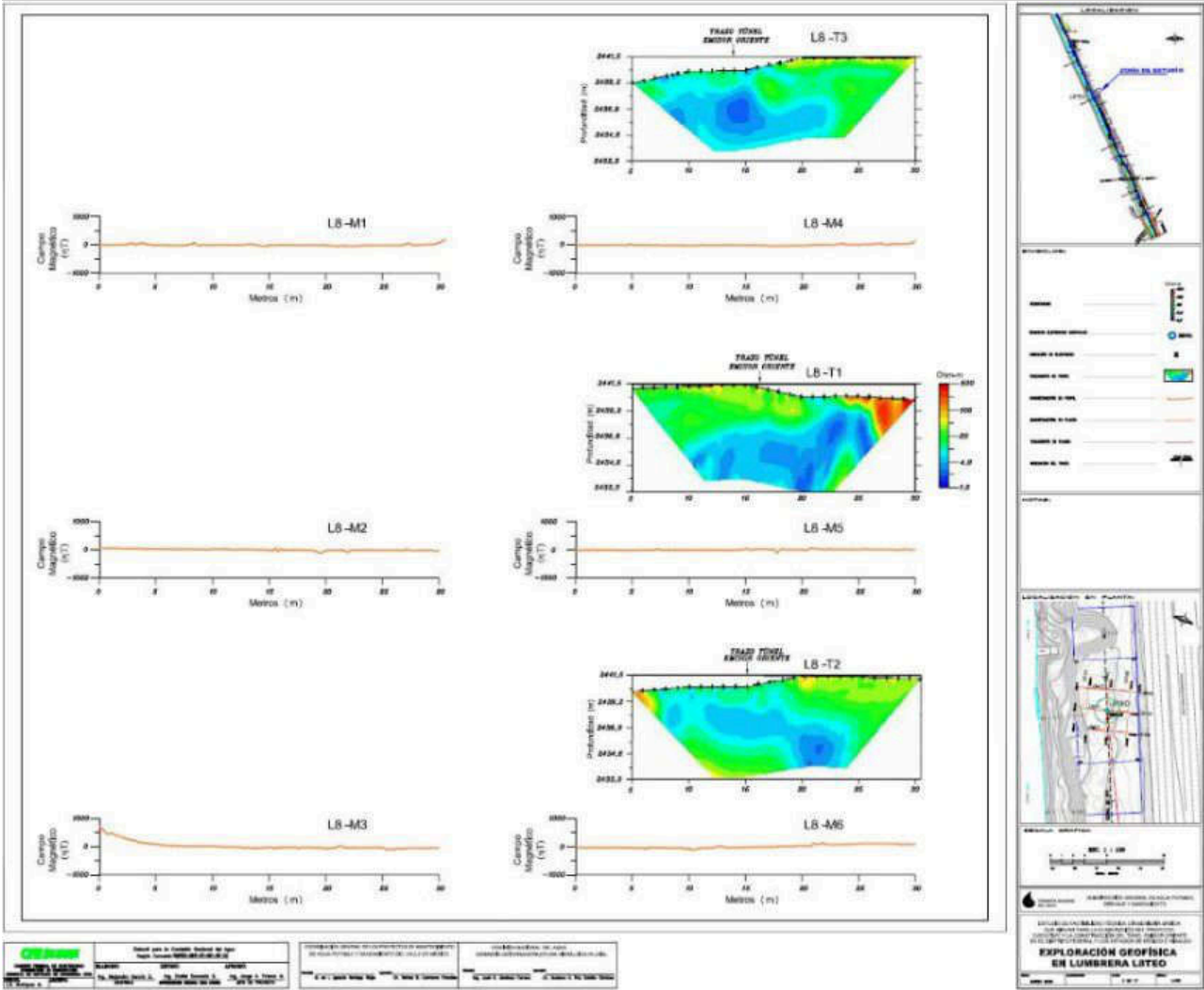


Figura 56. Registro de exploración geofísica en la lumbrera L8-TEO

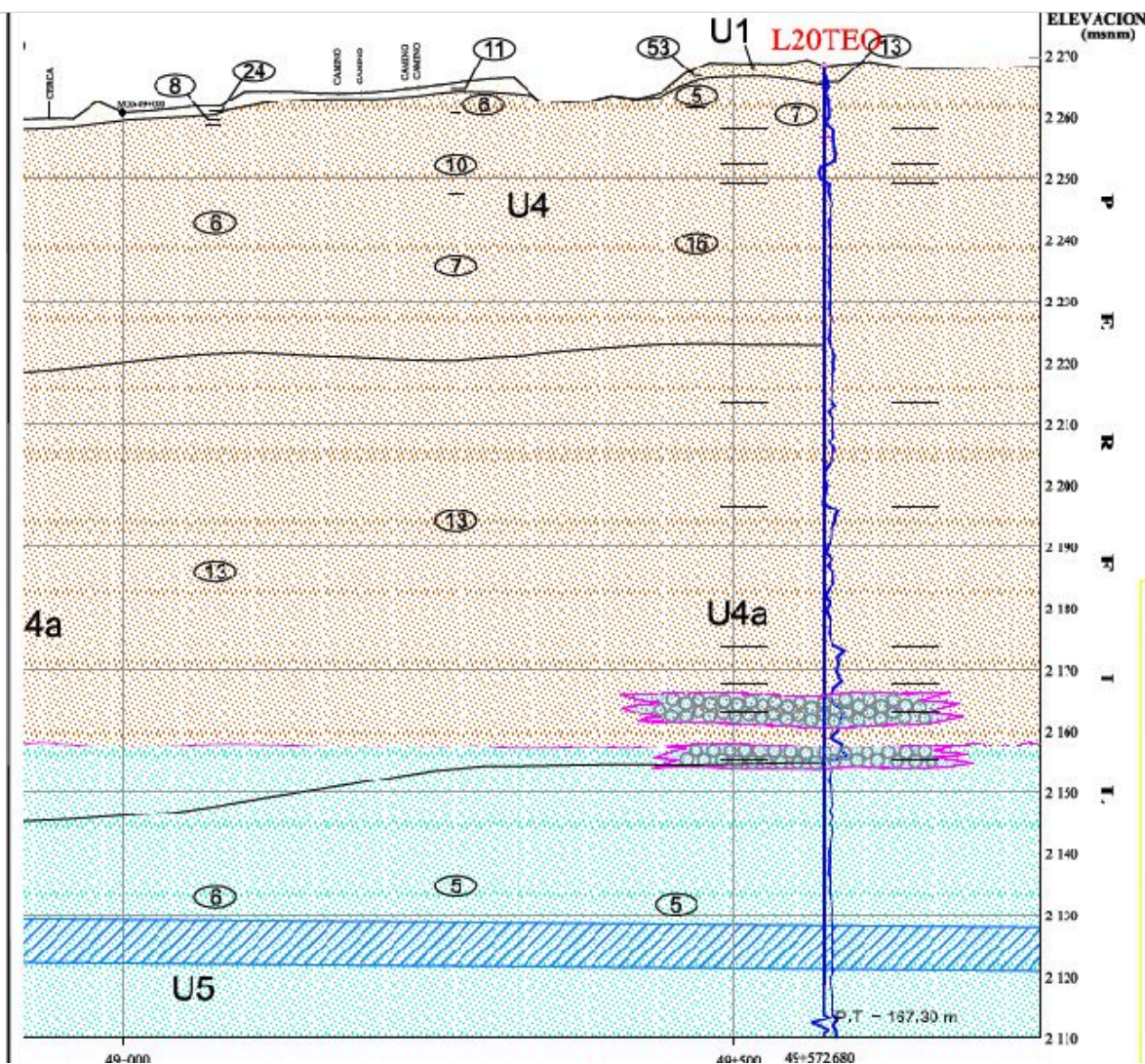


Figura 57. Sondeo eléctrico vertical en la lumbrera L-20

05

Estudios geohidrológicos

El estudio geohidrológico trata del agua subterránea: dónde está su nivel, con qué presión y cuánto caudal hay que extraer. La piezometría registra la presión del agua en el subsuelo con piezómetros; el abatimiento y las pruebas de bombeo miden cuánto baja el nivel al extraer agua de los pozos. Se leen como

niveles contra tiempo o profundidad. En el TEO sirvió para dimensionar los pozos de bombeo de las lumbreras, evitar fallas por subpresión y controlar el agua durante la excavación.

PERFILES

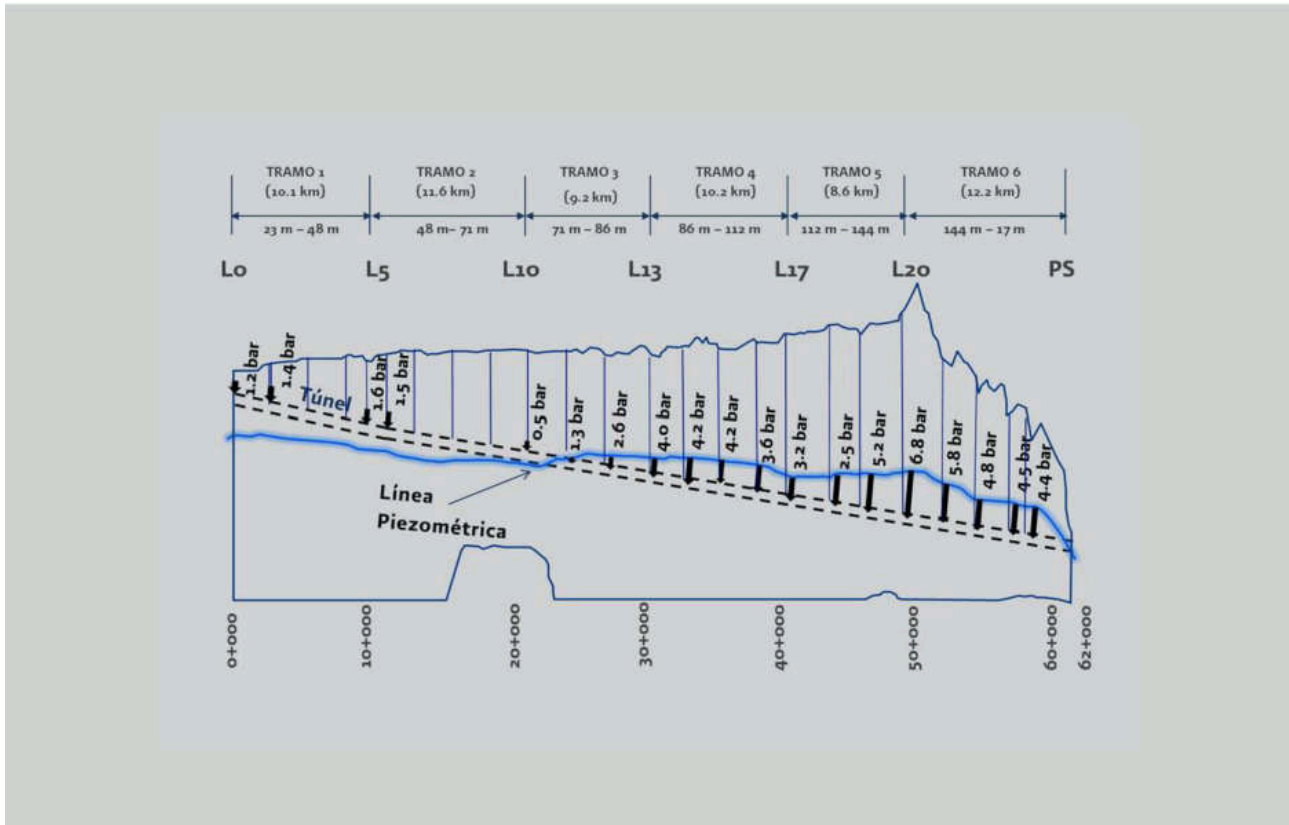


Figura 58. Perfil geohidrológico del TEO con la línea piezométrica

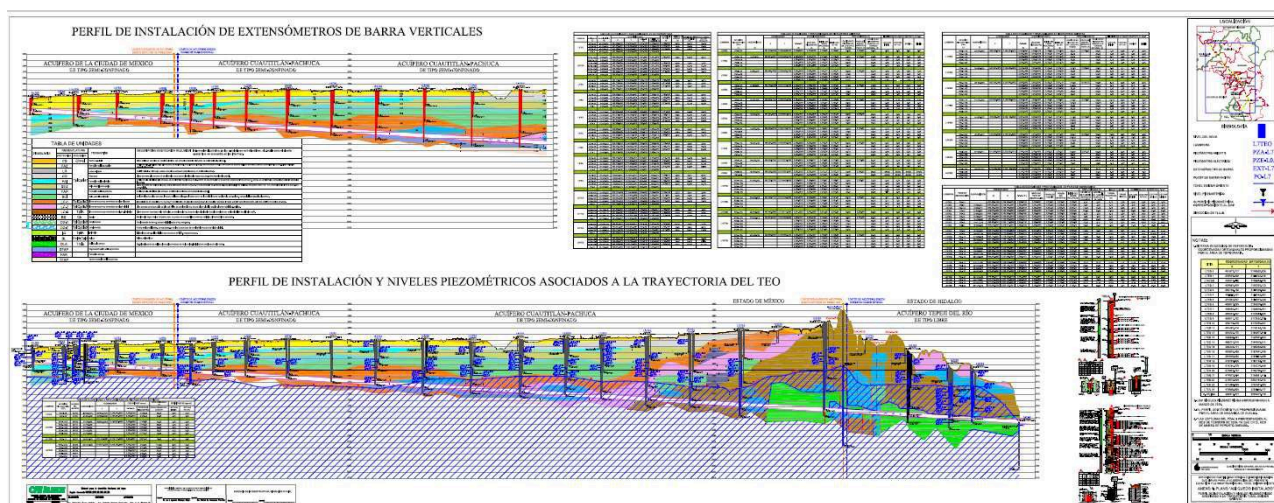


Figura 59. Perfil de instrumentación vertical a lo largo de los tres acuíferos del trazo

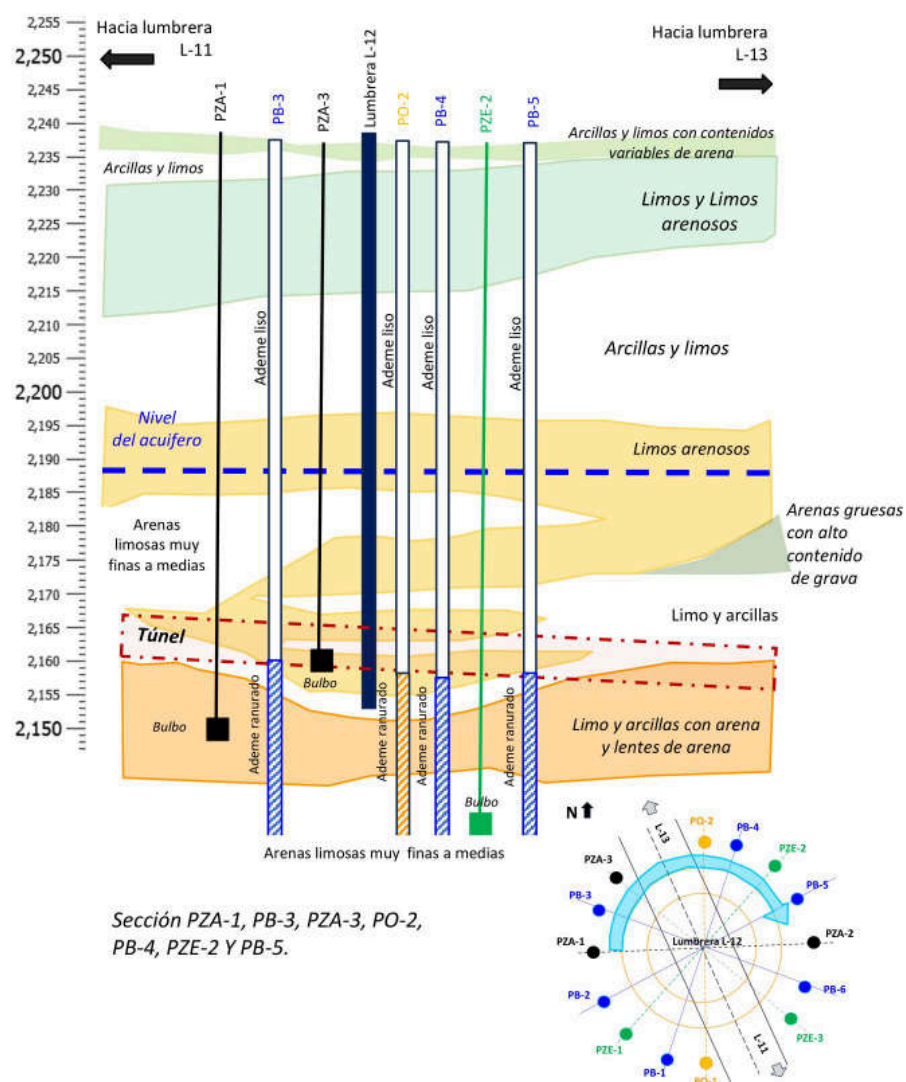


Figura 60. Perfil de pozos de abatimiento e instrumentos de la L-12

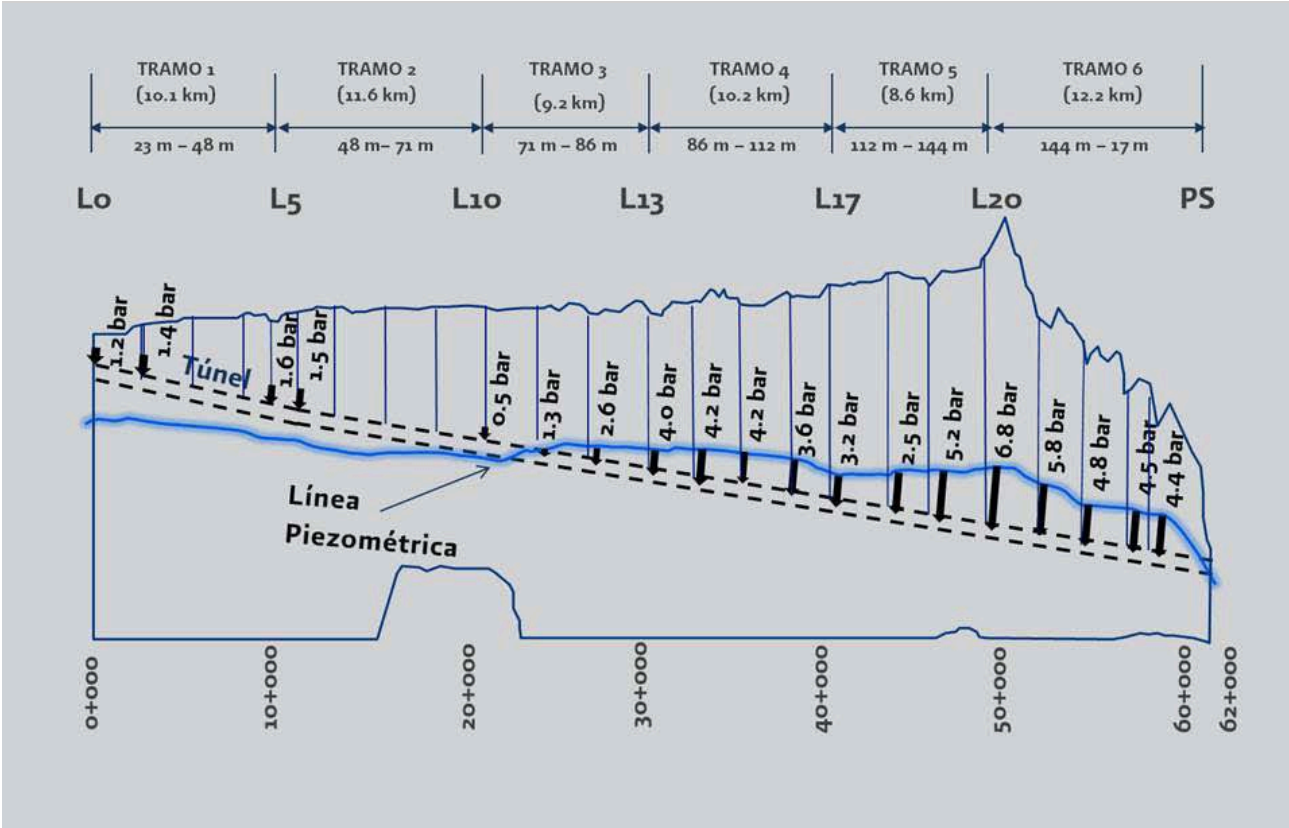


Figura 61. Perfil de presión de agua sobre el túnel por tramo, de la L-0 al portal

MAPAS



Figura 62. Aprovechamientos de agua y niveles estáticos en la quinta etapa, enero de 2009

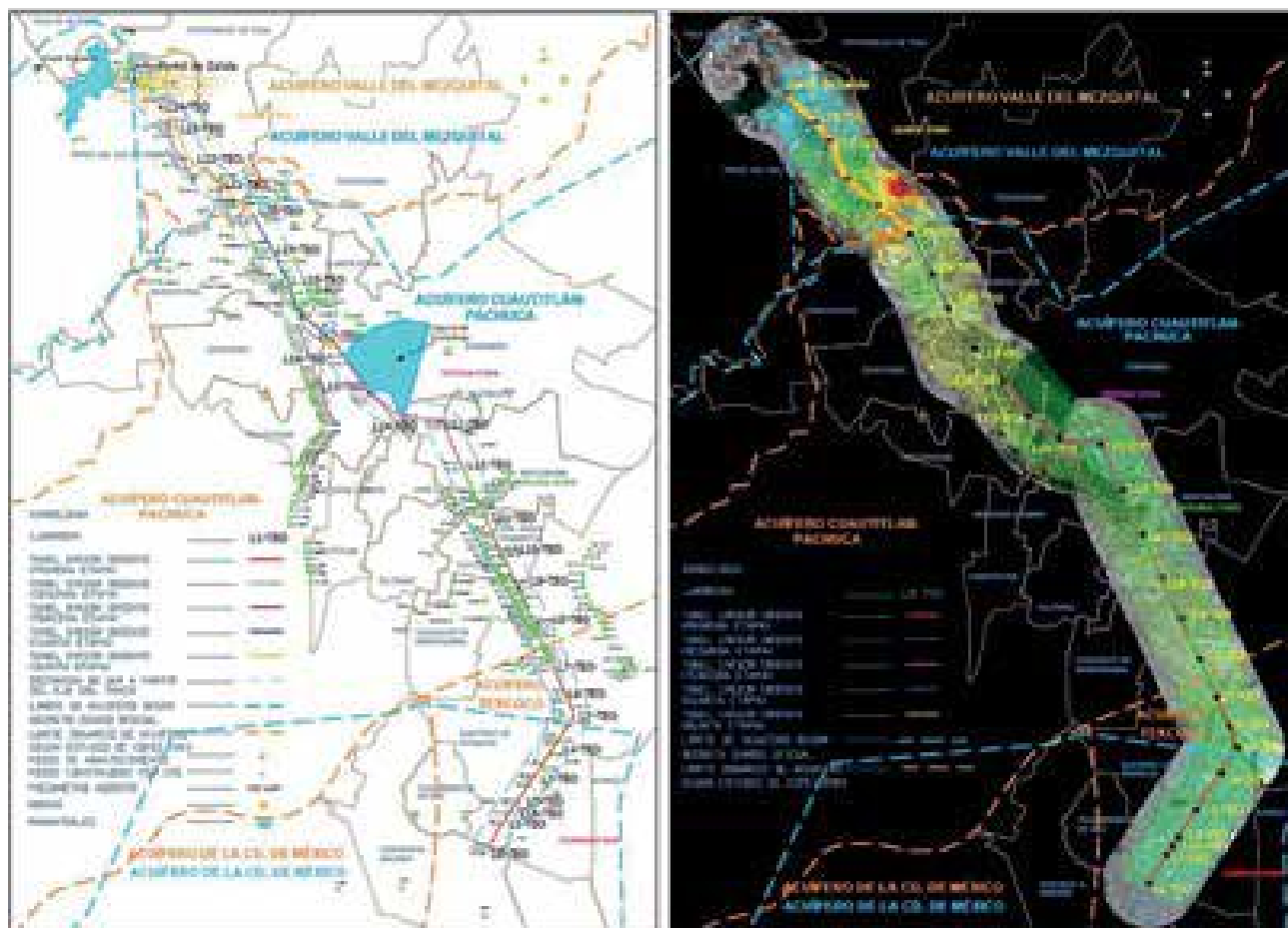


Figura 63. Aprovechamientos censados y niveles estáticos y dinámicos en una franja de 2 km sobre el eje

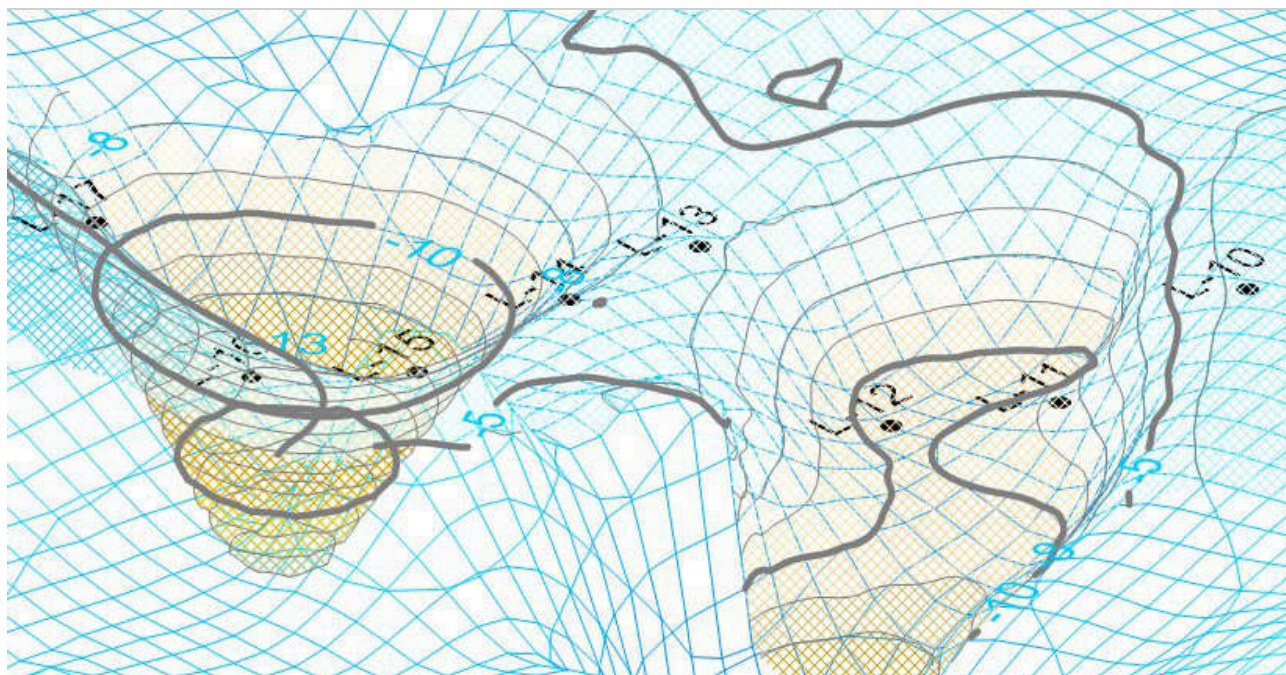


Figura 64. Mapa en tres dimensiones de la evolución del nivel estático de 1997 a 2007

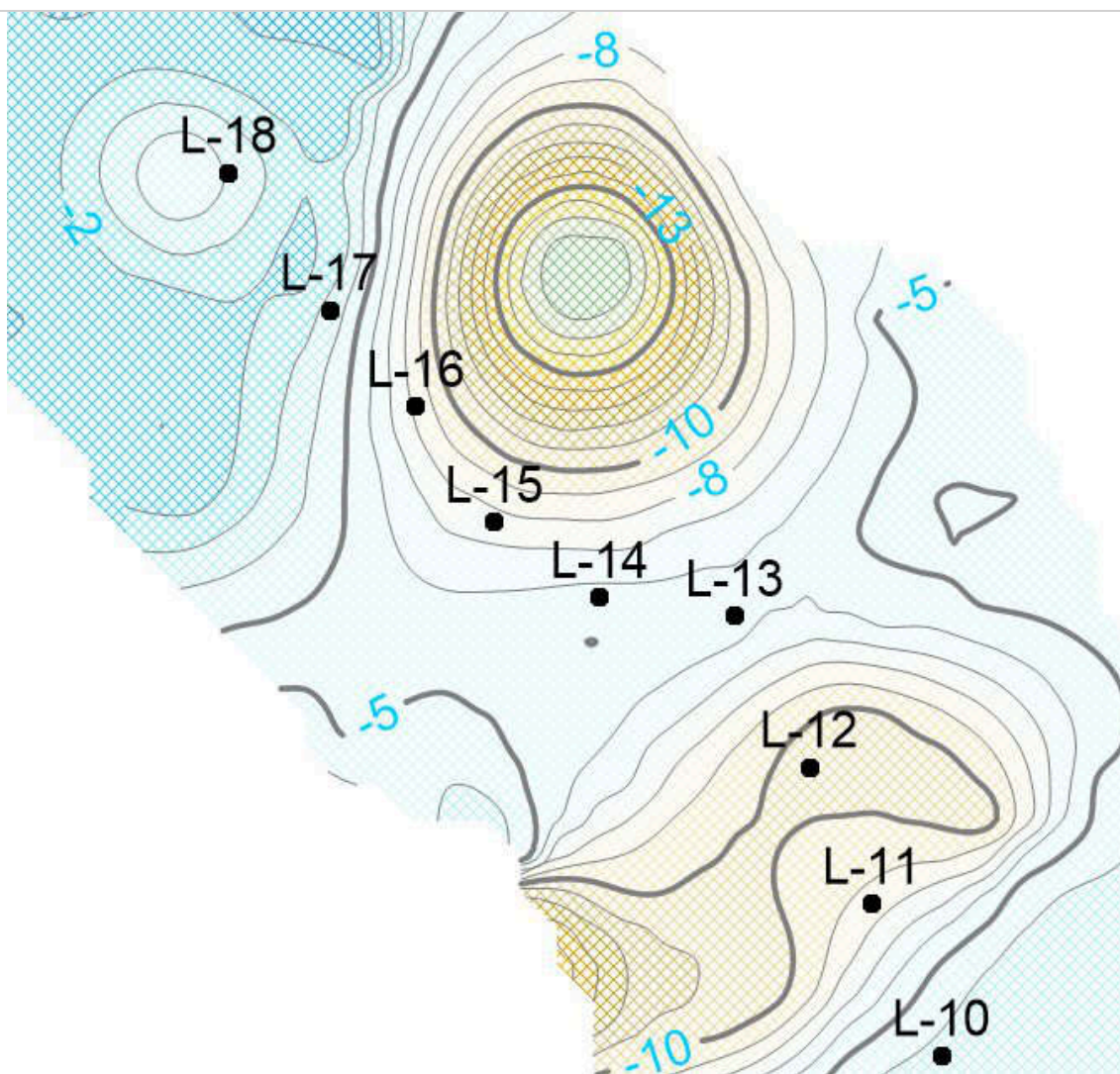


Figura 65. Mapa del nivel estático de 1997 a 2007, de la L-10 a la L-18





Figura 68. Planta de los seis pozos iniciales de abatimiento de la lumbrera L-12

REGISTROS Y ENSAYES



Figura 69. Registro de lecturas del pozo de observación POL-C-L12-02

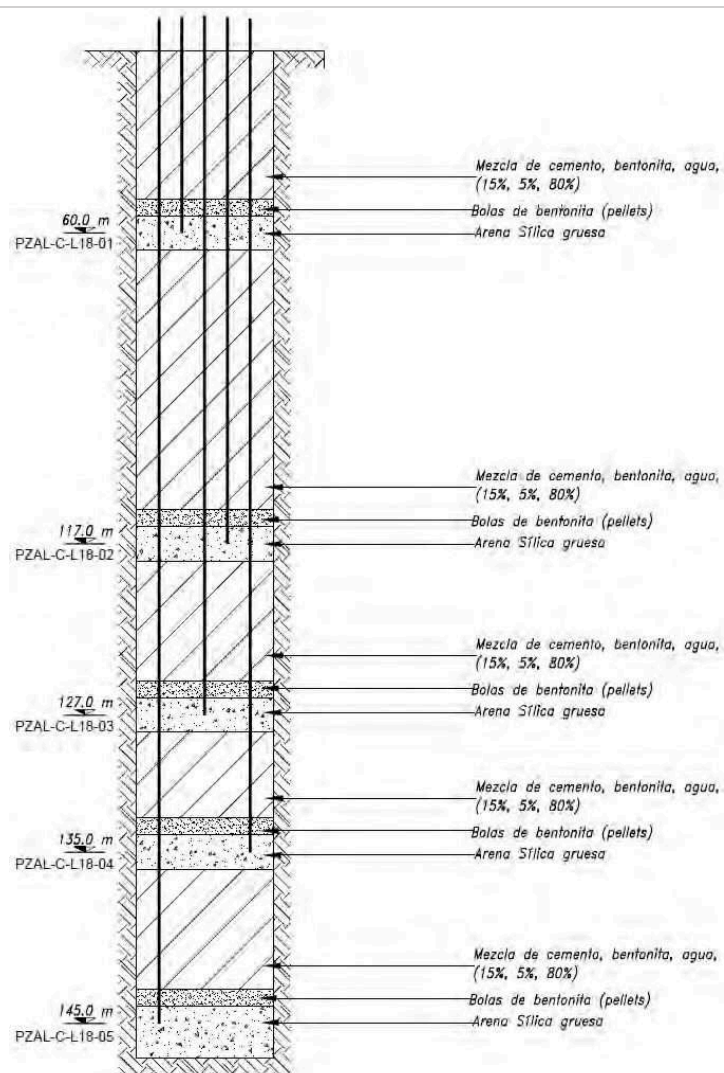


Figura 70. Registro de instalación de piezómetros de cuerda vibrante en la L-18

PRUEBAS

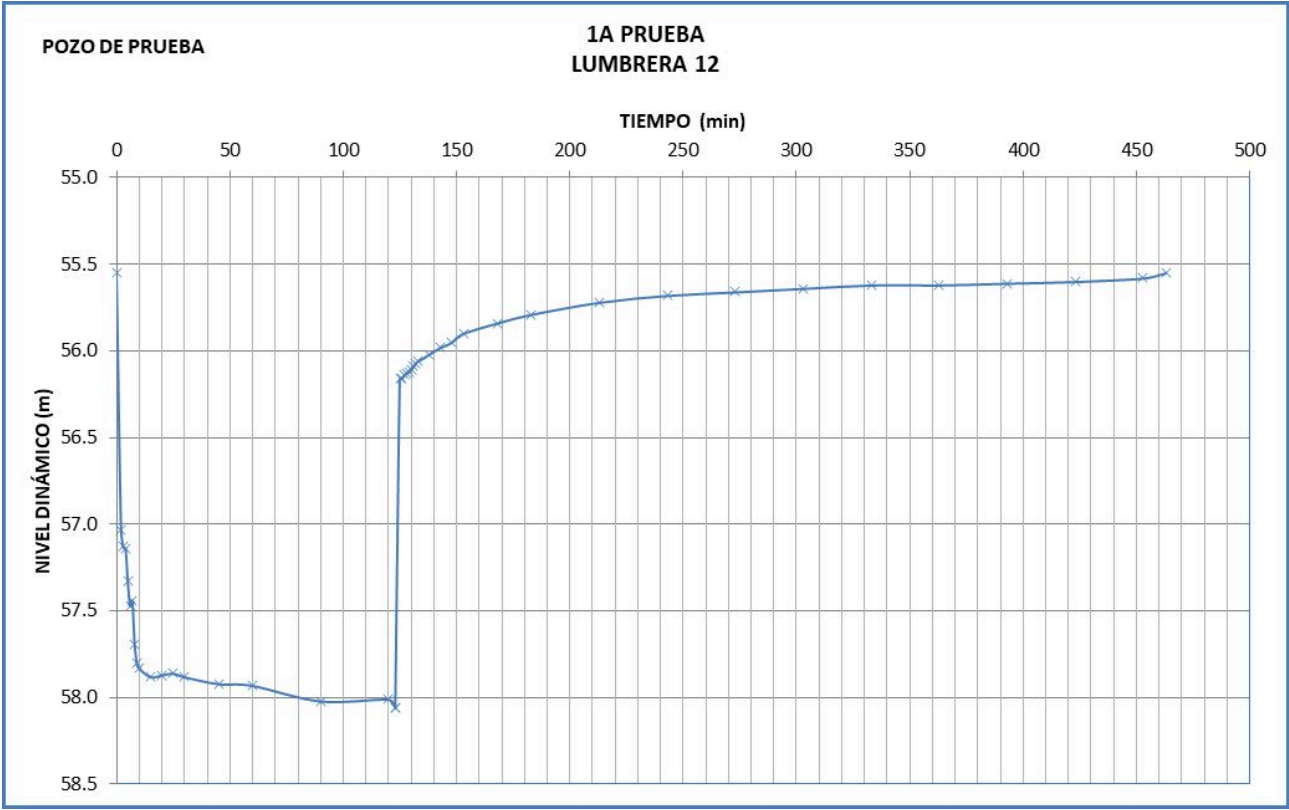


Figura 71. Prueba de bombeo en el pozo PB-3 de la L-12

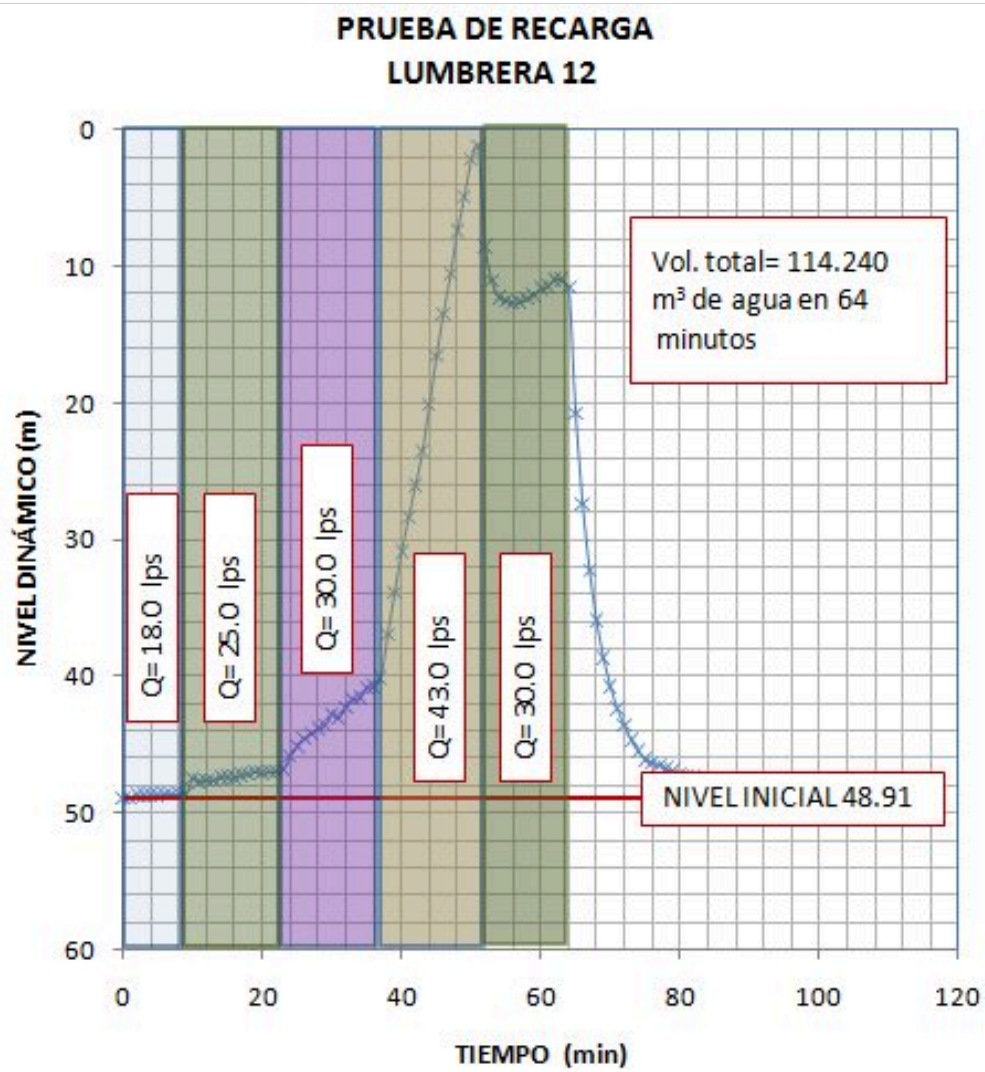


Figura 72. Prueba de recarga con el agua extraída en la L-12

MODELOS Y ESQUEMAS

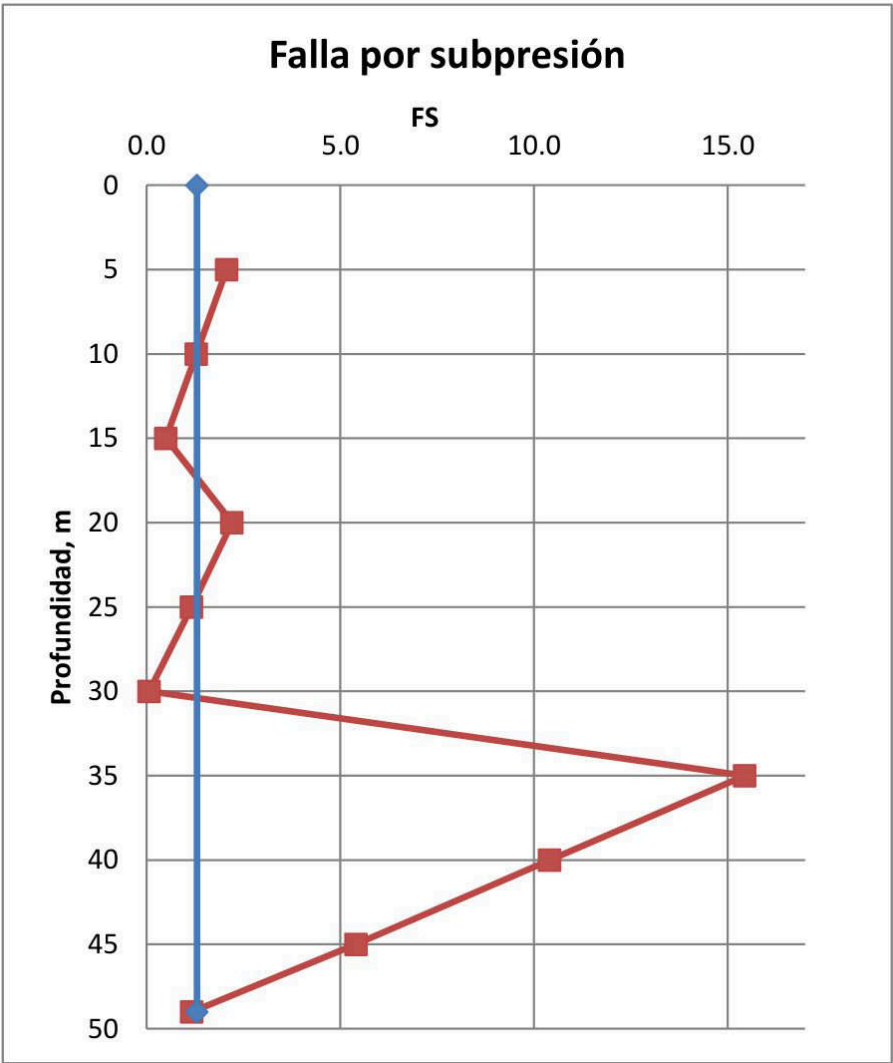


Figura 73. Modelo de falla por subpresión sin abatimiento en la L-04

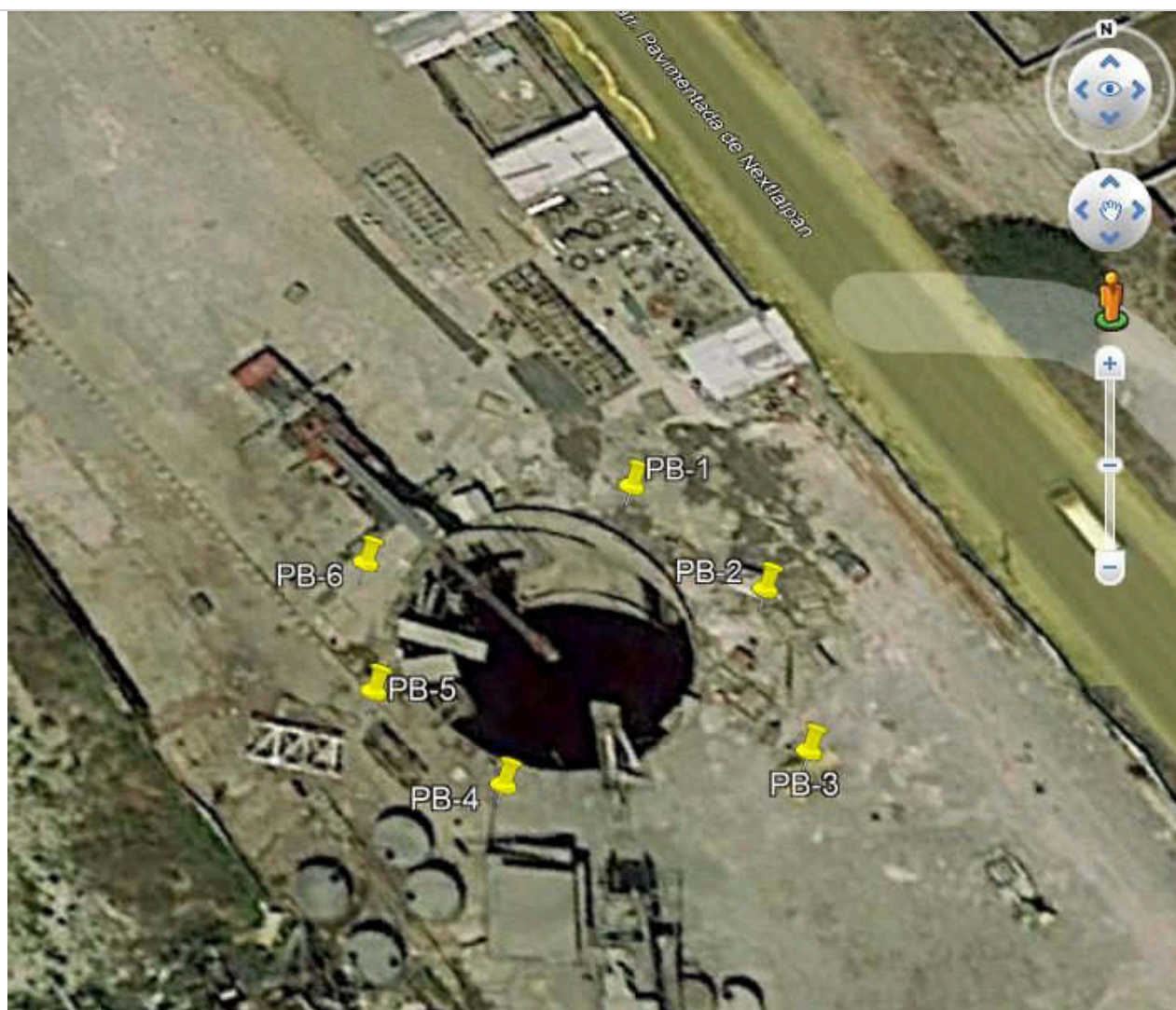


Figura 74. Esquema del módulo de prueba de bombeo de la lumbrera L-12

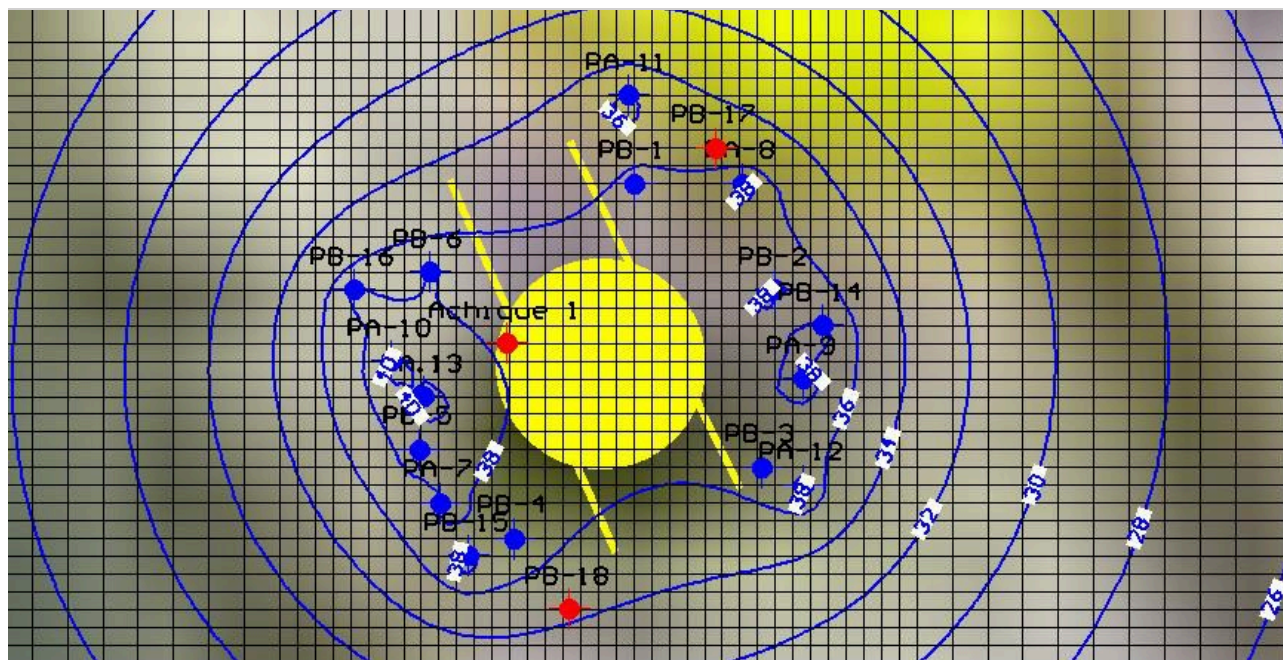
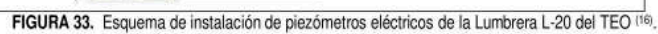


Figura 75. Modelo de flujo de la L-12



908

GRÁFICAS

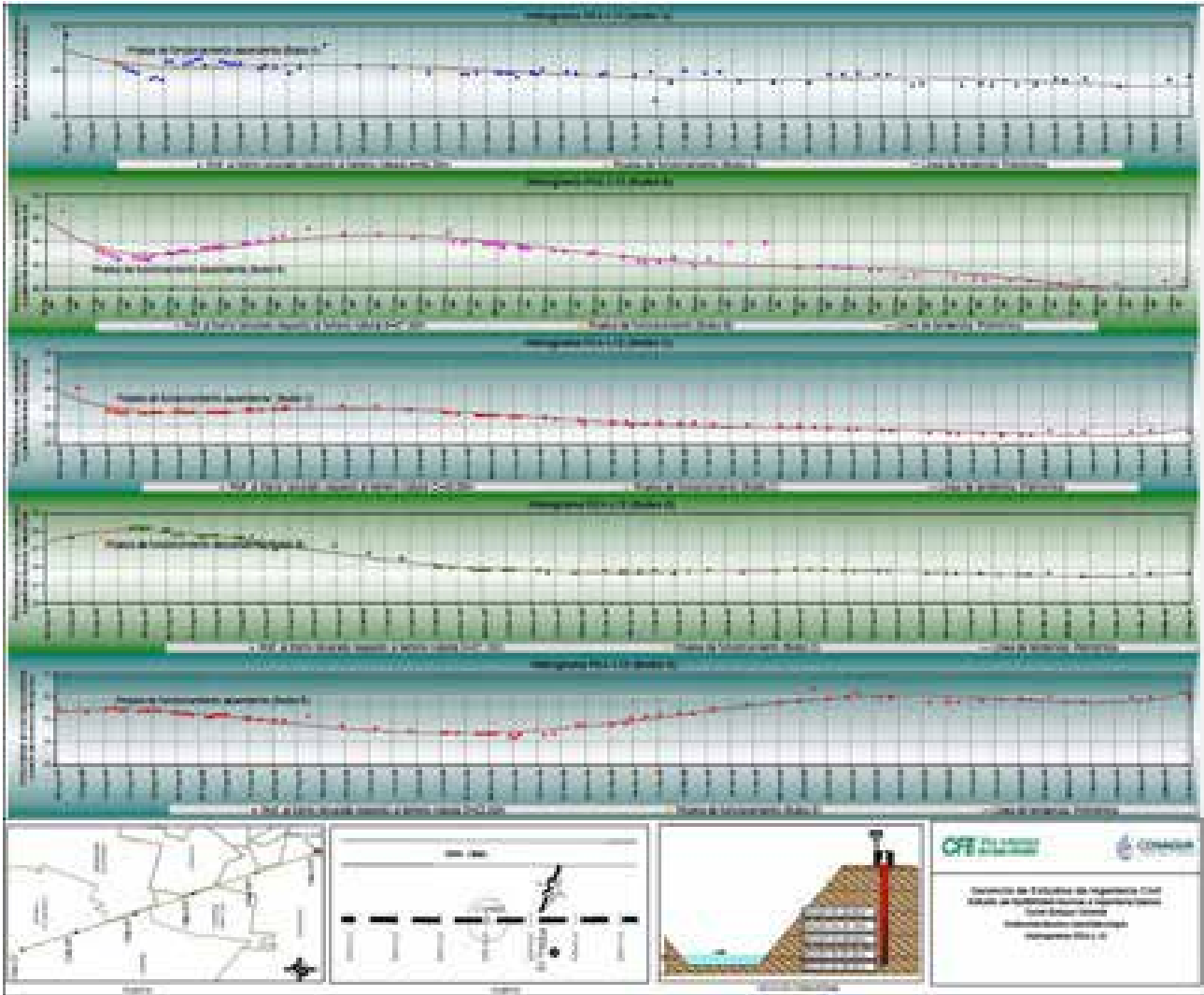


Figura 77. Niveles piezométricos medidos en la lumbrera L12 de agosto de 2008 a marzo de 2009

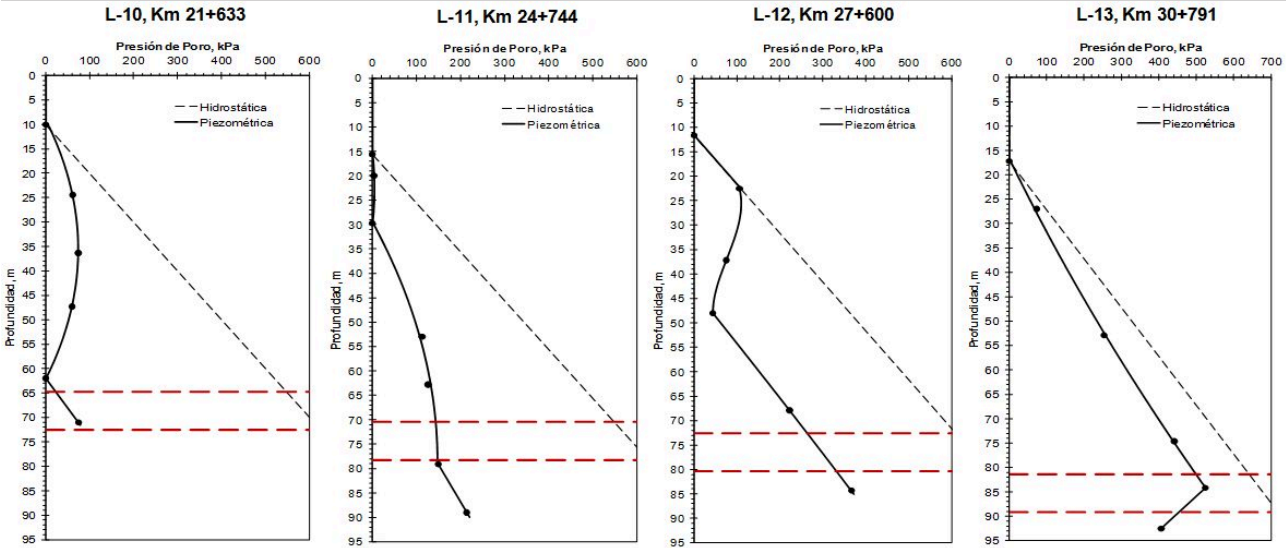
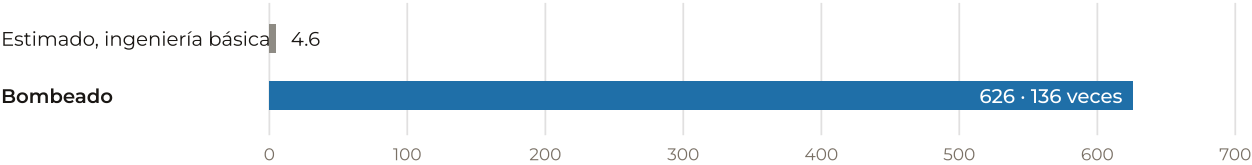


Figura 78. Gráfica de presión de poro e hidrostática en las lumbreras L-10 a L-13

L-12: el agua que no estaba en el estudio

gasto de agua al frente de la lumbrera, litros por segundo



Factor de seguridad por subpresión: 0.11 contra 1.3 mínimo. Bombeo durante 873 días.

Elaboración propia con datos de González Ramírez (2023, pp. 37-38, 101, 142); la razón 626/4.6 es cálculo propio.

Figura 79. Gráfica de caudal estimado y caudal bombeado en la lumbrera L-12

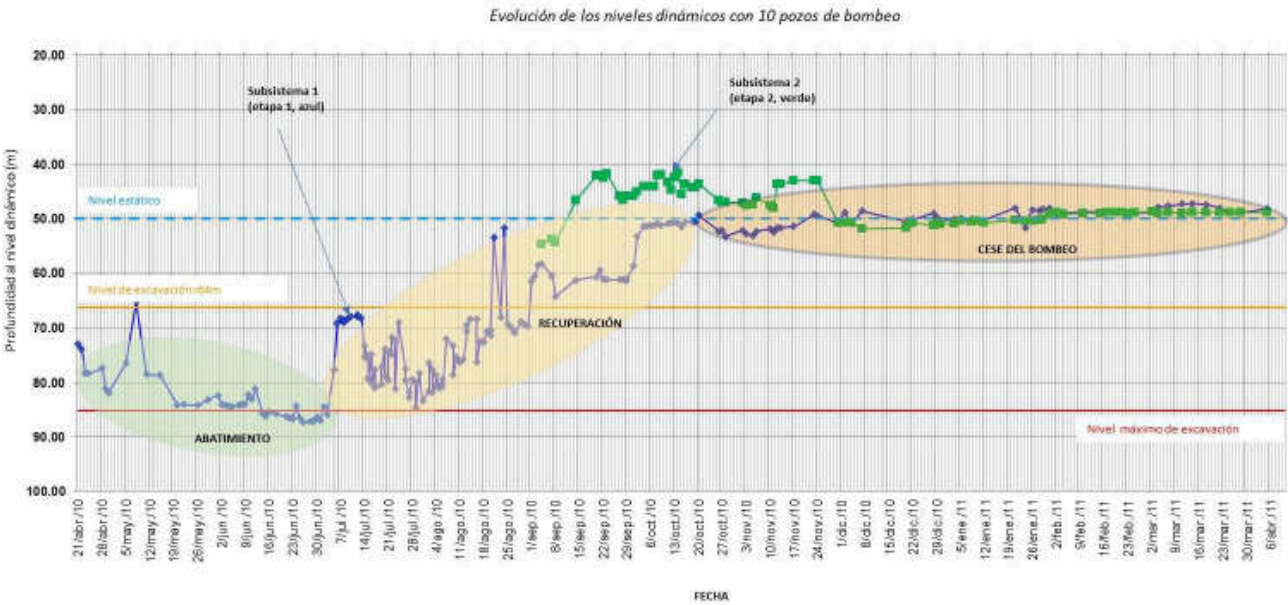


Figura 80. Gráfica de niveles dinámicos con diez pozos de bombeo en la L-12

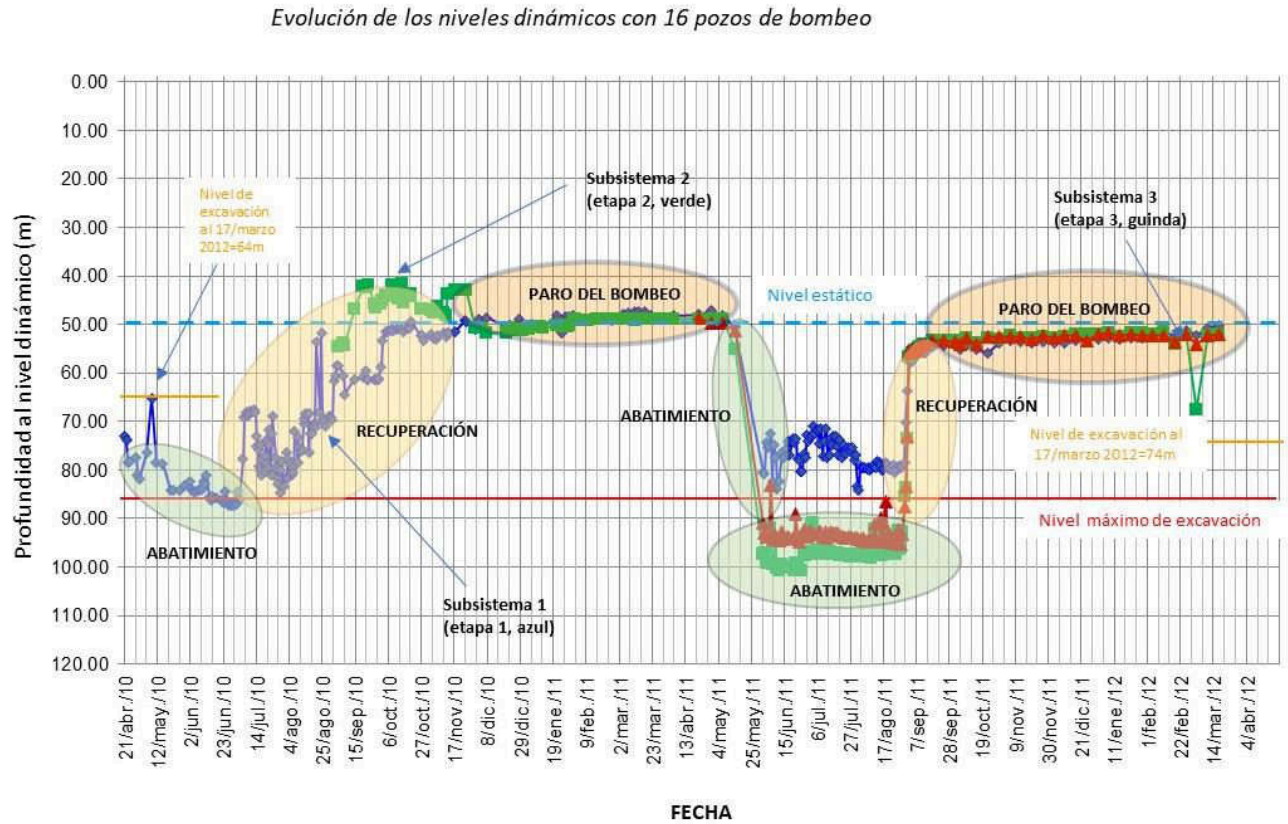


Figura 81. Gráfica de niveles dinámicos con 16 pozos de bombeo en la L-12

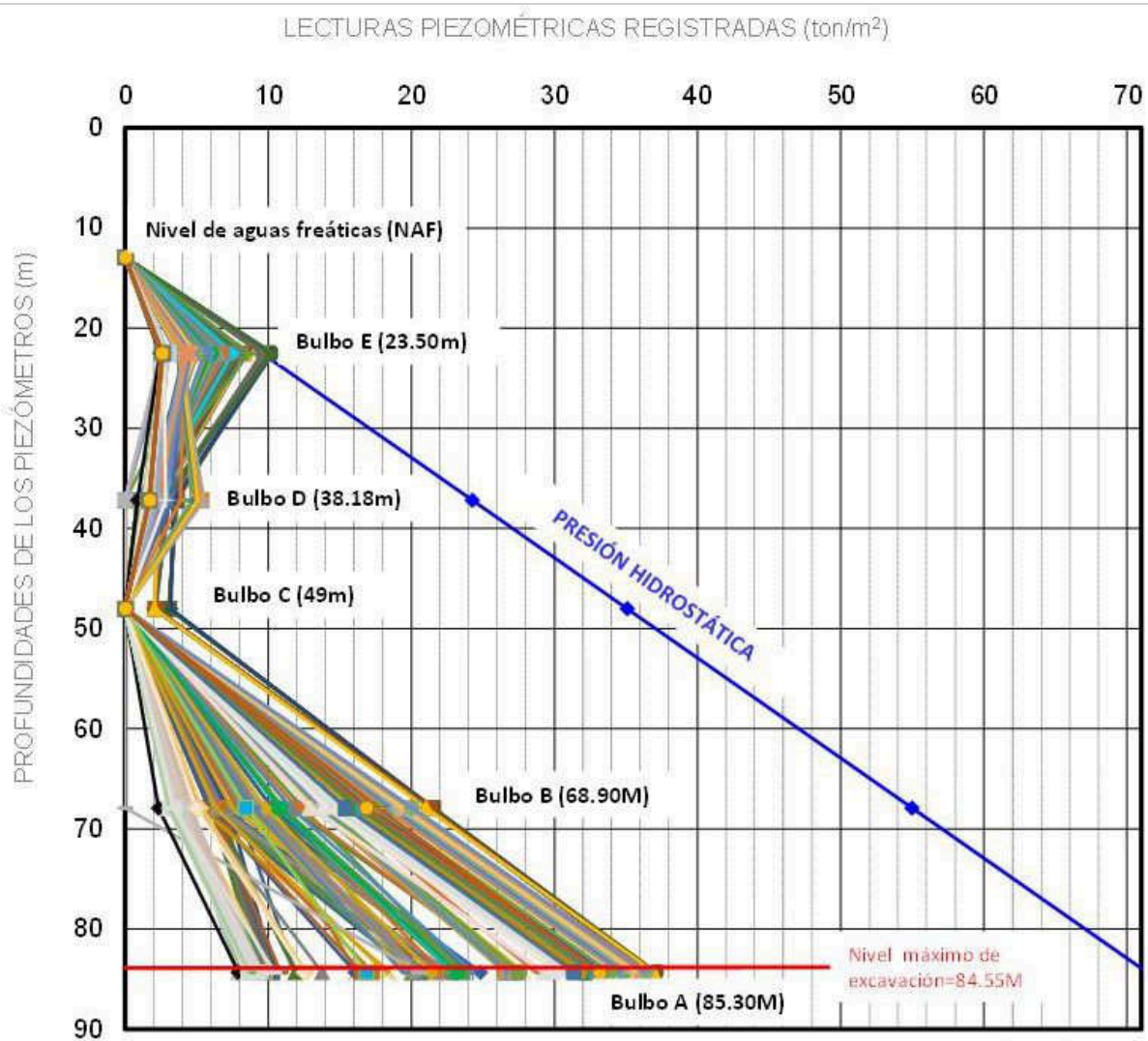


Figura 82. Gráfica de lecturas piezométricas contra profundidad en la lumbrera L-12

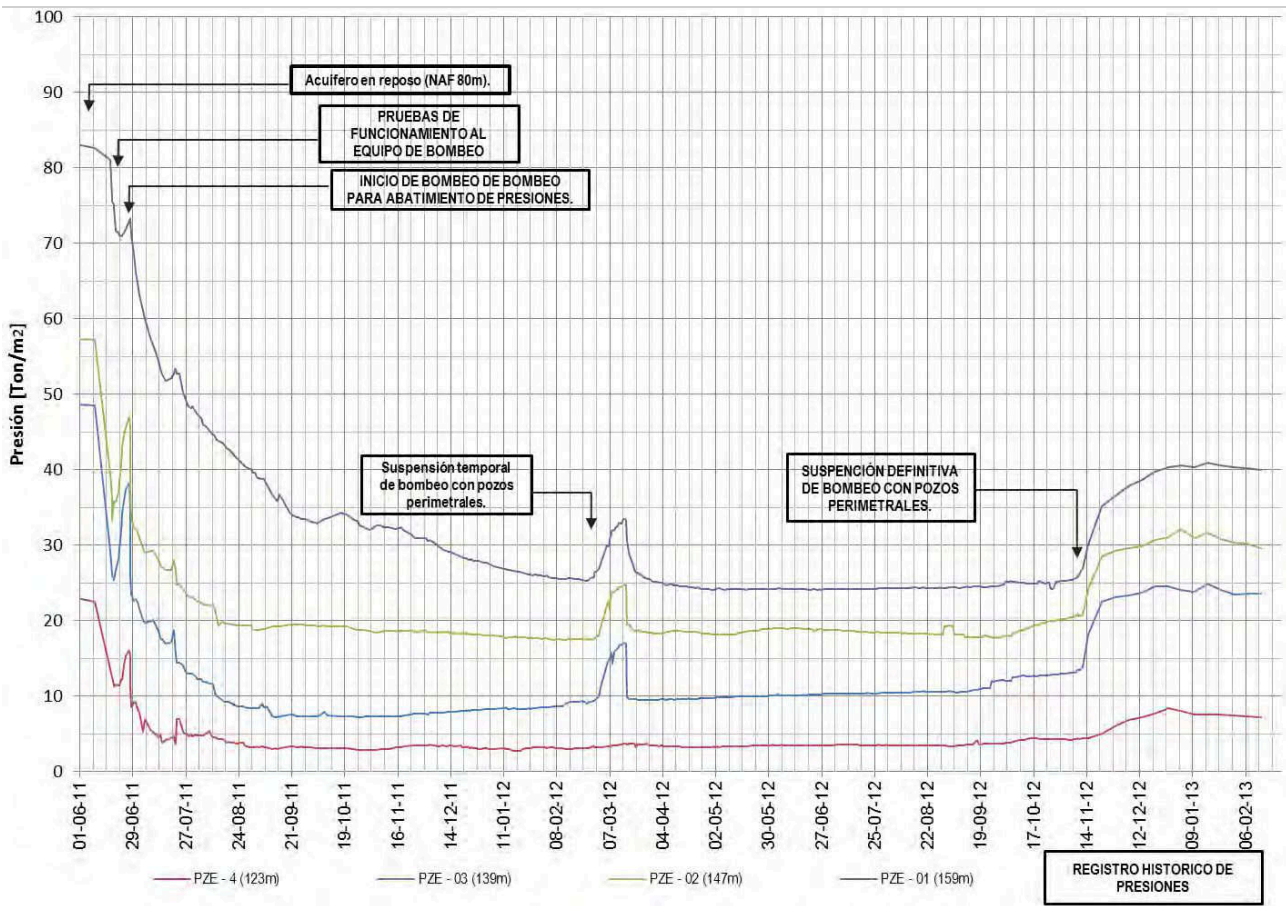


Figura 83. Gráfica de presiones de los piezómetros eléctricos de la L-20 con el bombeo

INFORMES



Figura 84. Informe final de los estudios geohidrológicos de ingeniería básica

06

Estudios hidrológicos e hidráulicos

Los estudios hidrológicos calculan cuánta agua llega al sistema de drenaje y cuándo; los hidráulicos estudian cómo escurre por las estructuras, incluso con modelos físicos a escala. Sus figuras son mapas de captaciones, perfiles de la

línea de agua, gráficas de gasto y modelos del vertedor. En el TEO sirvieron para fijar el gasto de diseño, las captaciones y el funcionamiento del portal de salida y el vertedor sobre el río El Salto.

PERFILES

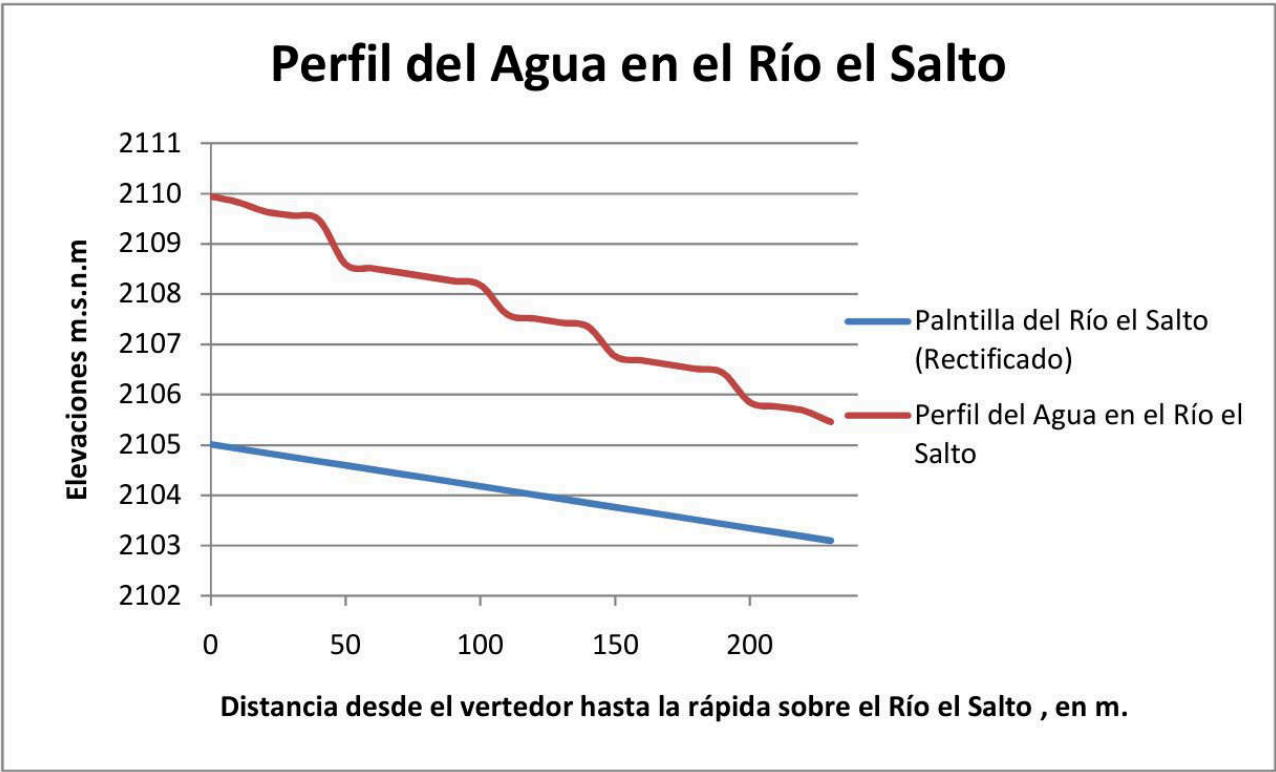


Figura 85. Perfil del agua sobre el río El Salto

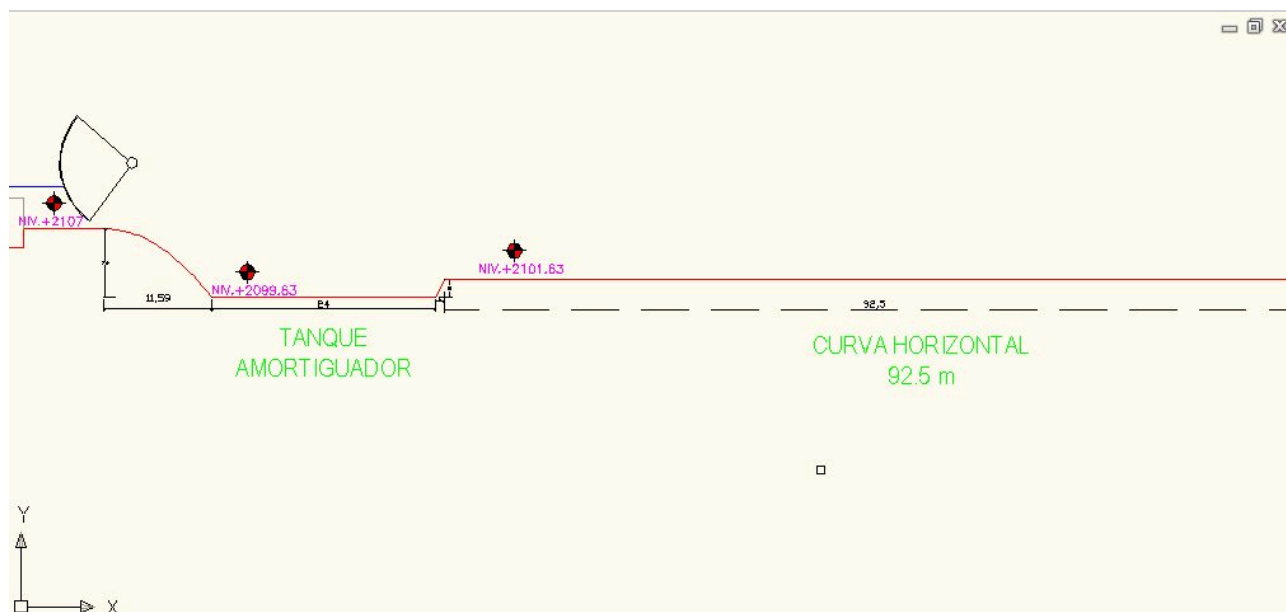


Figura 86. Perfil de la conexión con el acceso a las alcantarillas

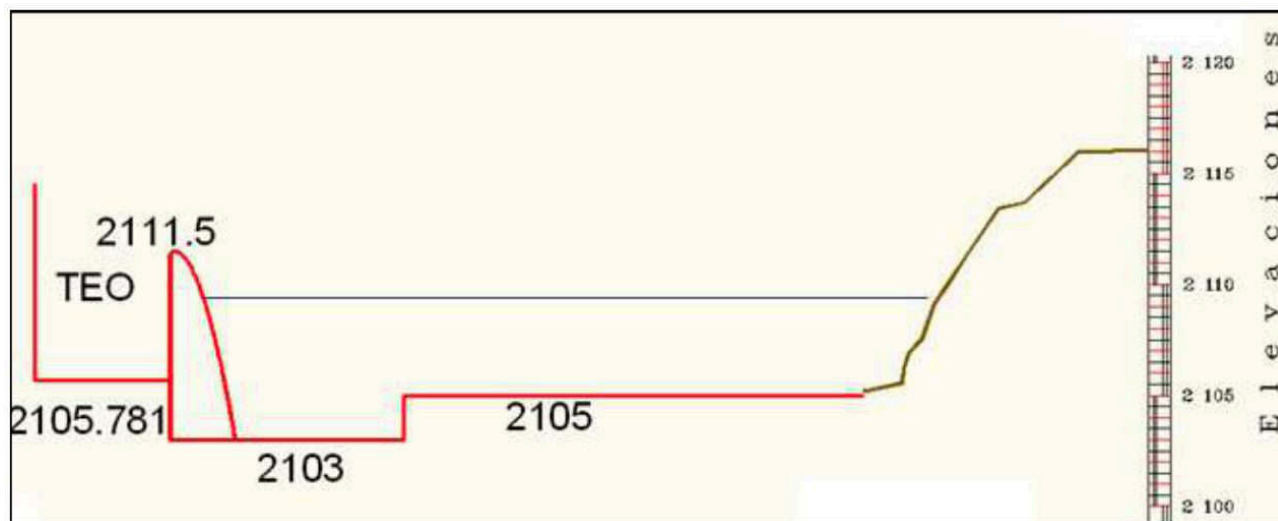


Figura 87. Perfil del vertedor del TEO en el modelo físico

PLANTAS

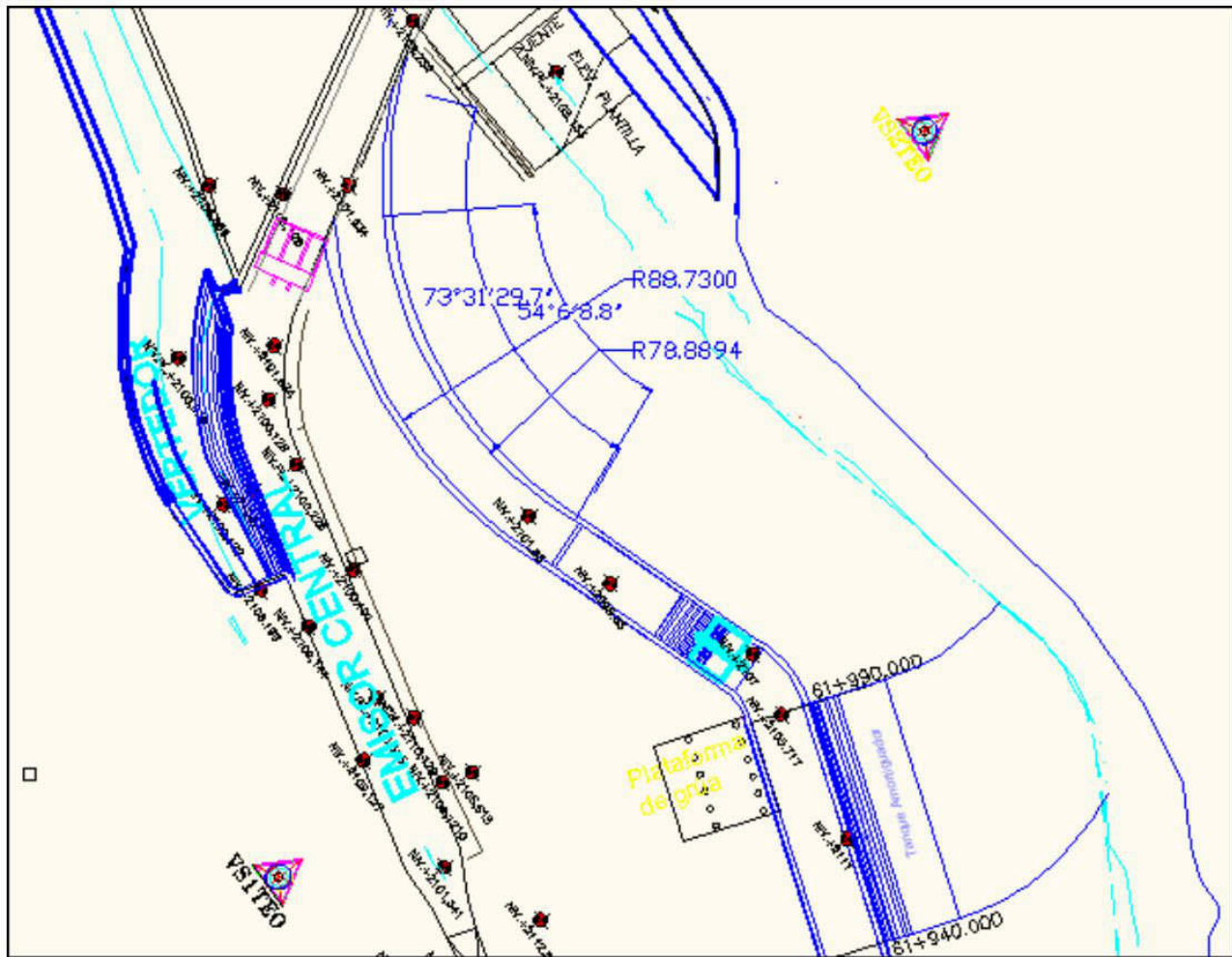


Figura 88. Planta y perfil del arreglo propuesto del portal y del vertedor

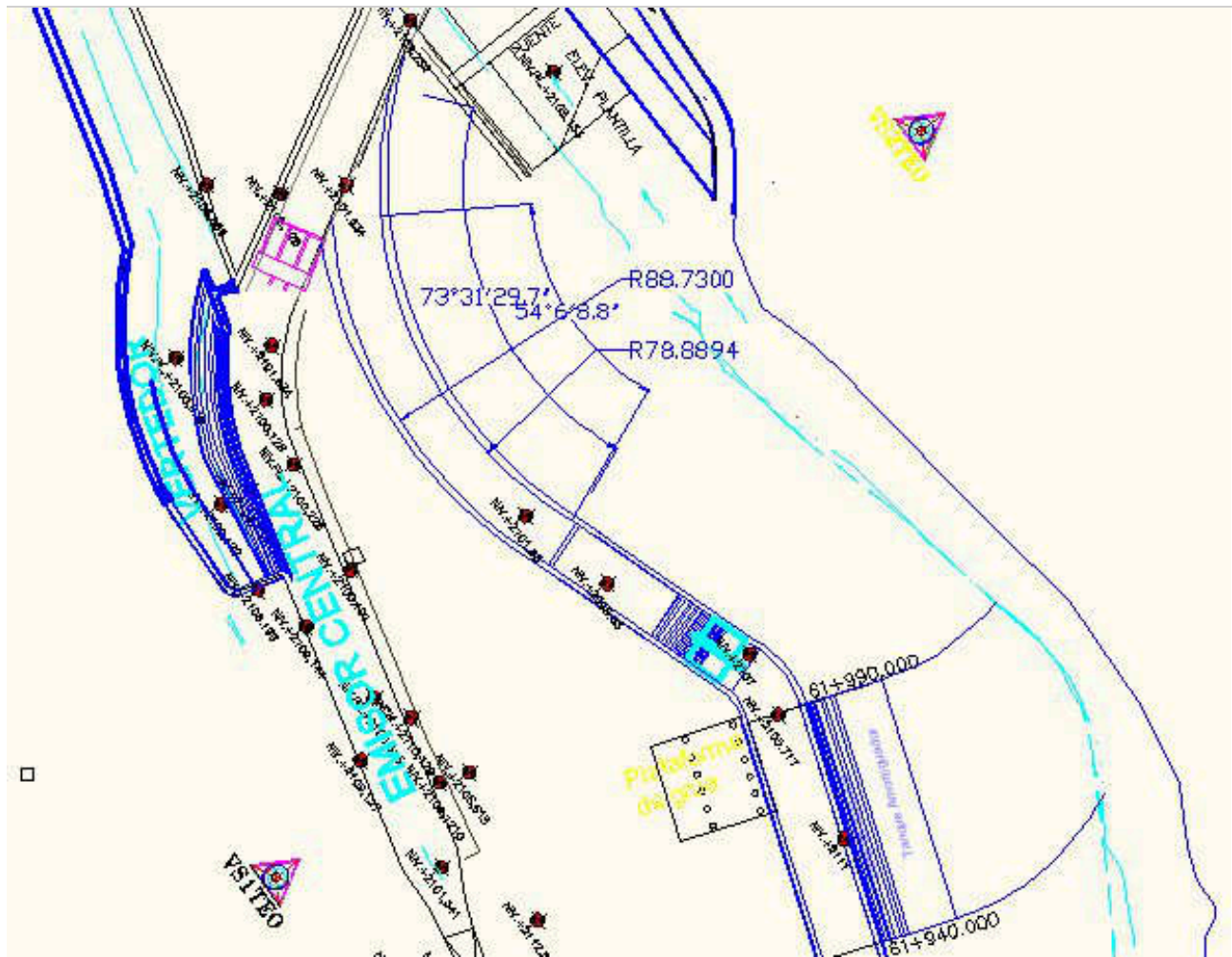


Figura 89. Planta del arreglo propuesto para el portal de salida

MODELOS Y ESQUEMAS

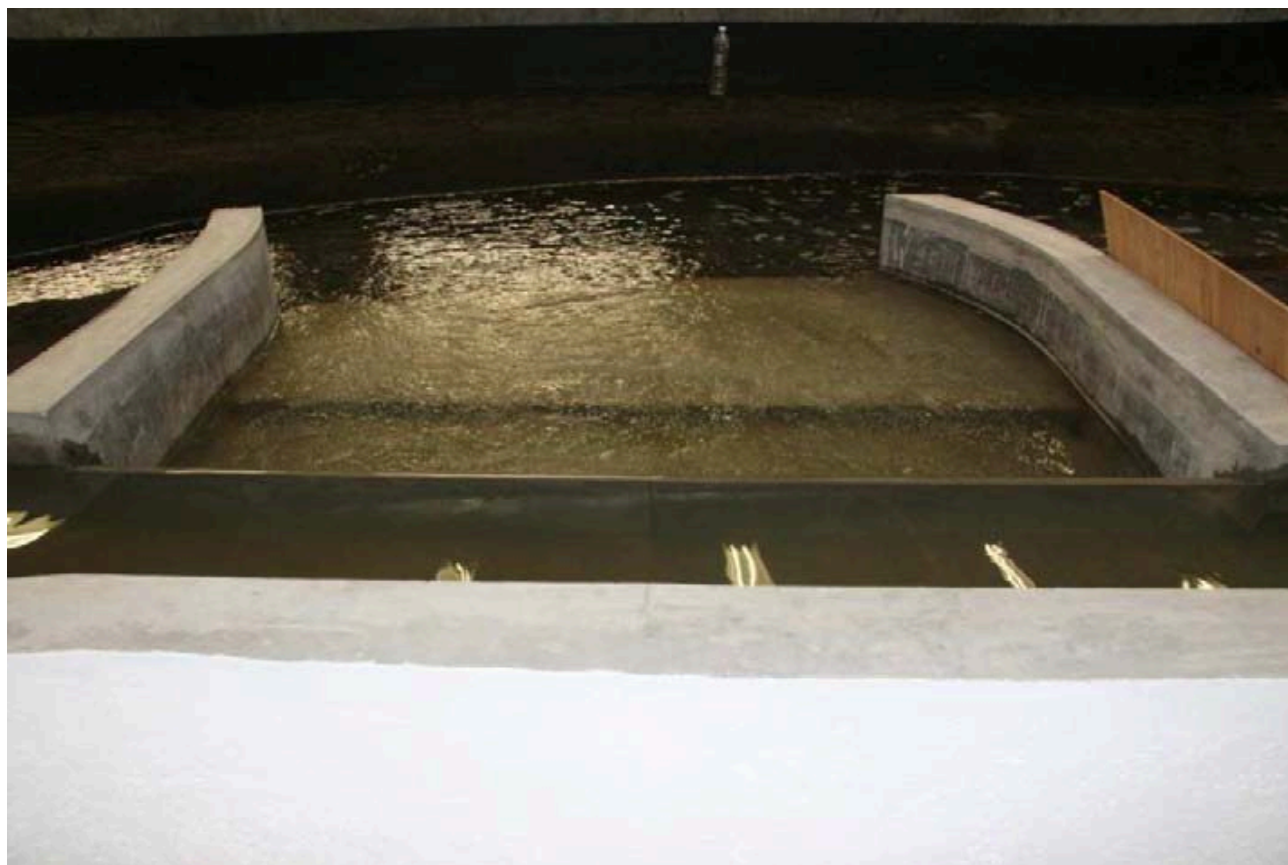
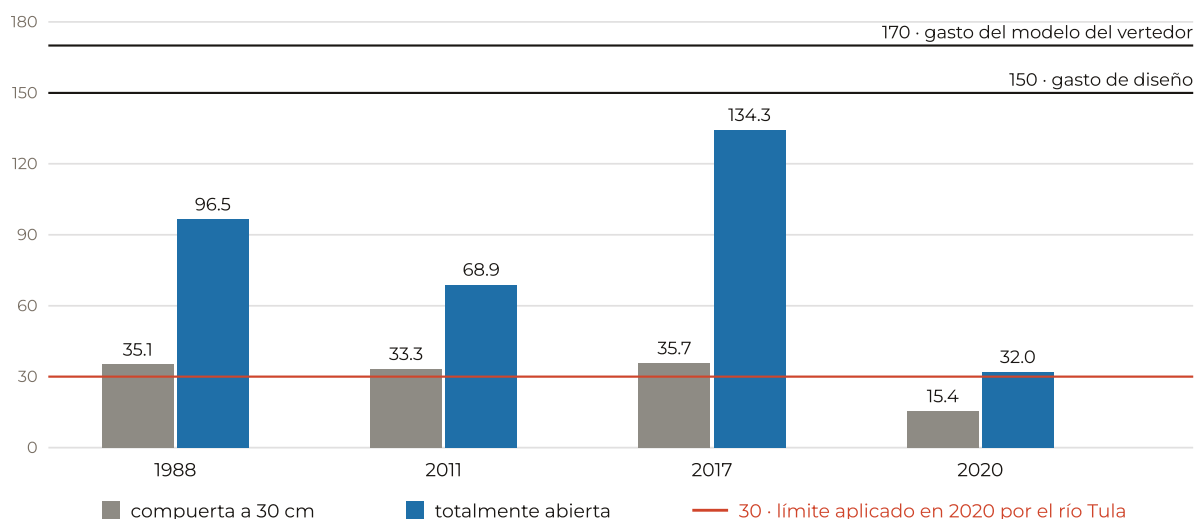


Figura 90. Modelo físico del vertedor de excedencias del TEO

GRÁFICAS

Gasto máximo a la salida del TEO en cuatro tormentas

m³/s, con la compuerta a 30 cm y totalmente abierta



Elaboración propia con datos de Vázquez Martínez (2021, tabla 8.3, pp. 143-145). La tabla de origen dice TEC en el título; se lee TEO ($134.3 / 170 = 79\%$).

Figura 91. Gráfica del gasto máximo de salida del TEO según la apertura de la compuerta

07

Estudio de impacto ambiental

El estudio de impacto ambiental (la manifestación de impacto ambiental, MIA) describe el medio físico, biológico y social por donde pasa la obra y los efectos que tendría. Sus figuras son mapas temáticos del área de estudio, como edafología, hidrogeología y uso de suelo, y fichas de sitios, como los bancos de tiro. Se leen como cartografía con simbología por unidad. En el TEO sirvió para evaluar el proyecto ante la autoridad ambiental y definir dónde colocar el material excavado.

MAPAS

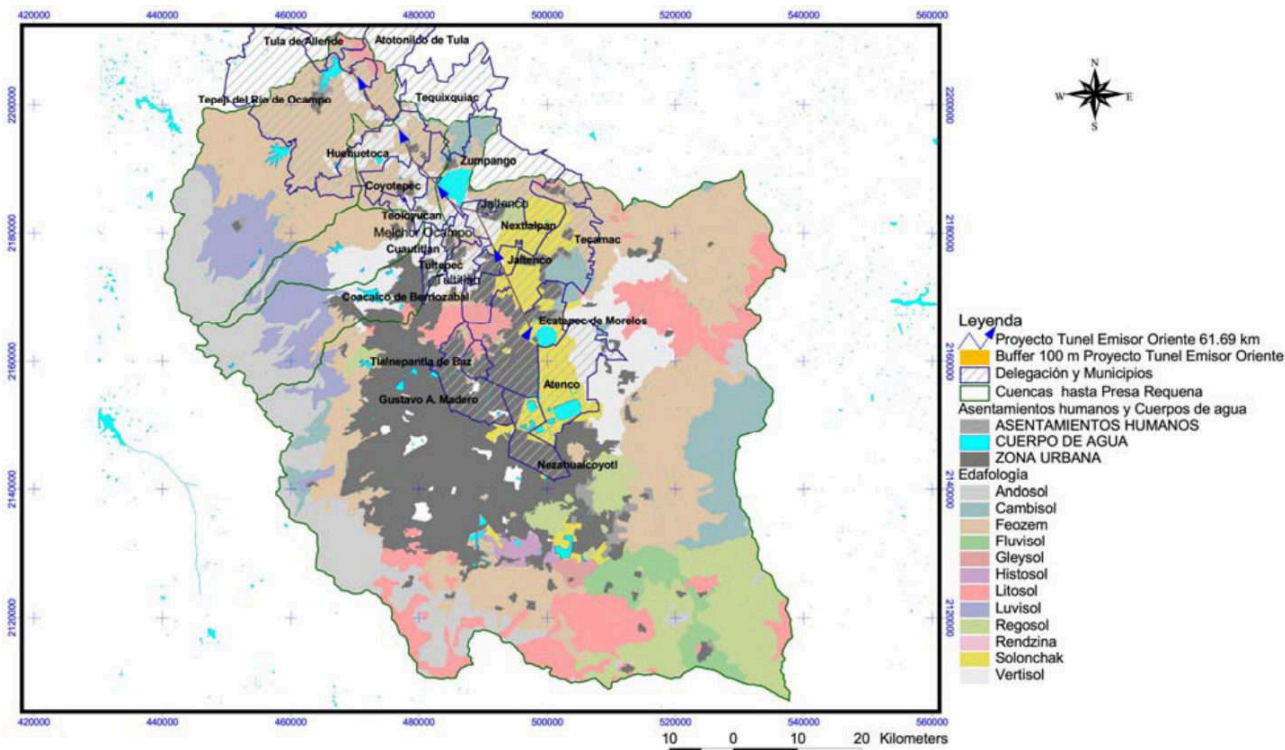


Figura IV.4 Edafología de la zona de estudio

Figura 92. Mapa de edafología del área de estudio

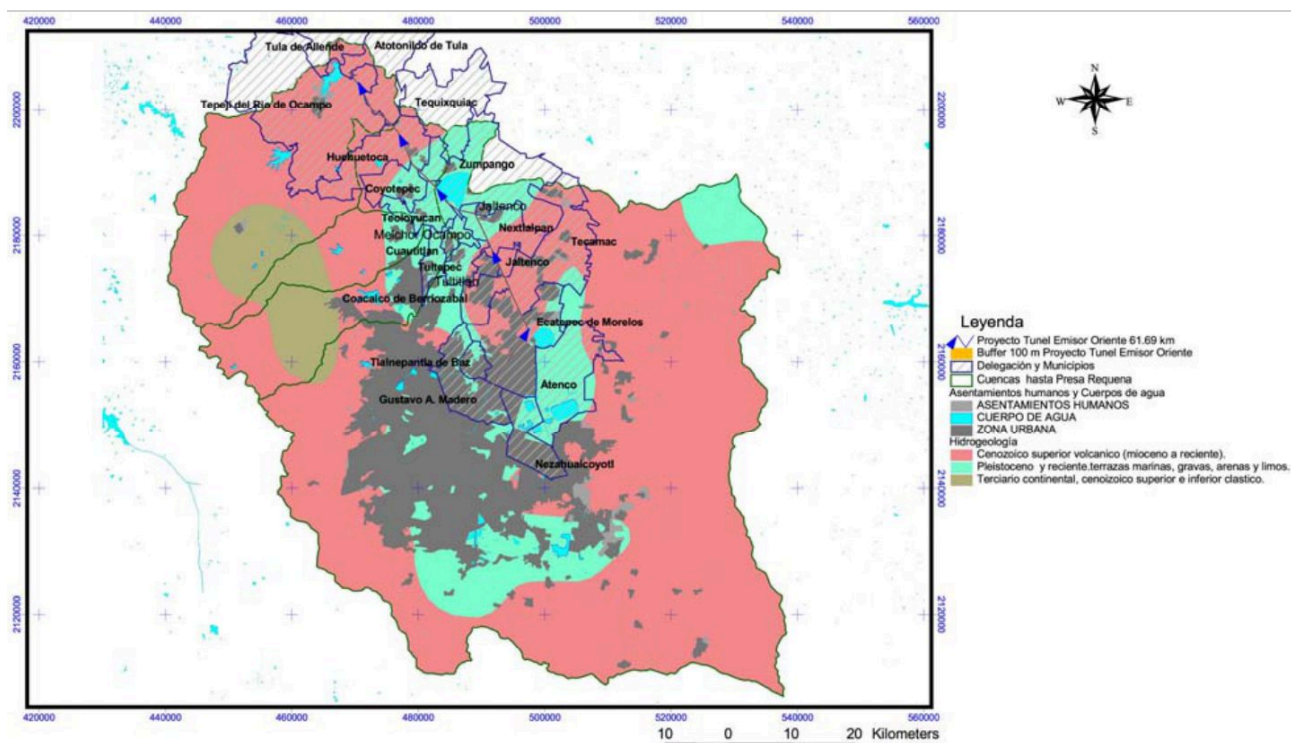


Figura 93. Mapa de hidrogeología del área de estudio

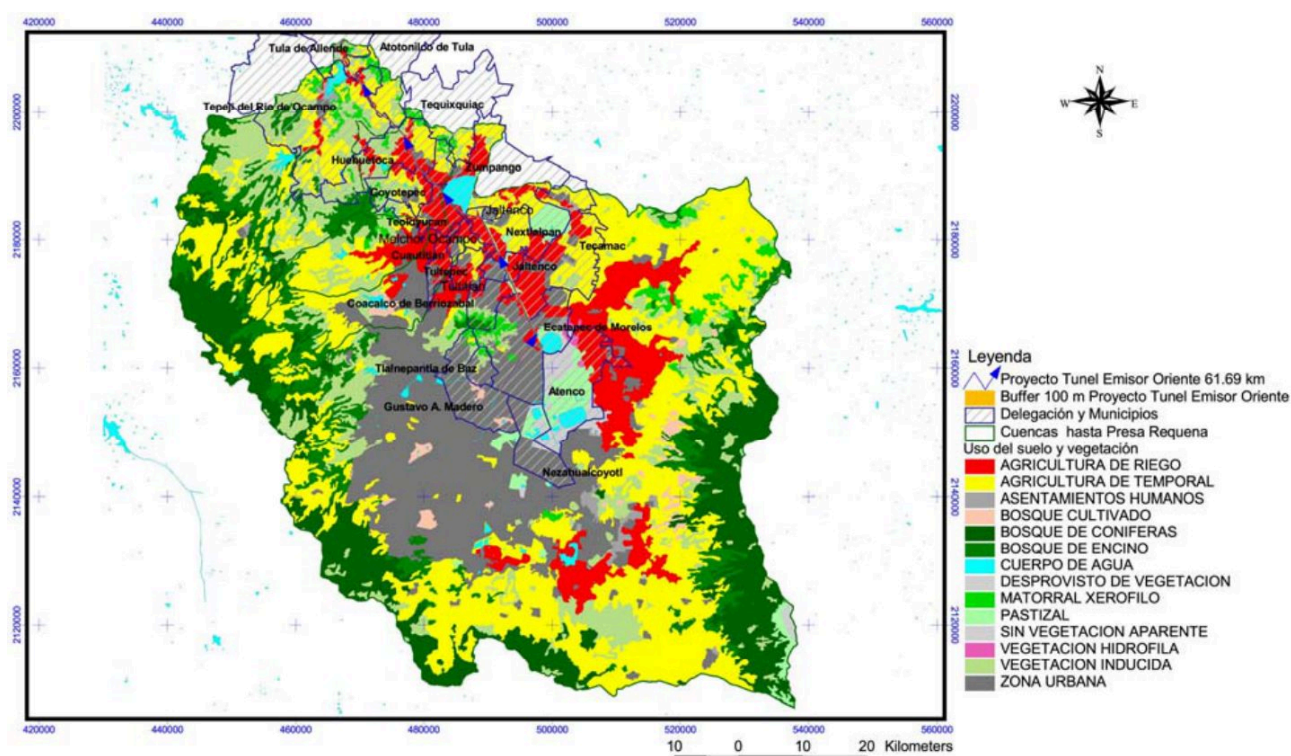


Figura 94. Mapa de uso de suelo y vegetación del área de estudio

FICHAS

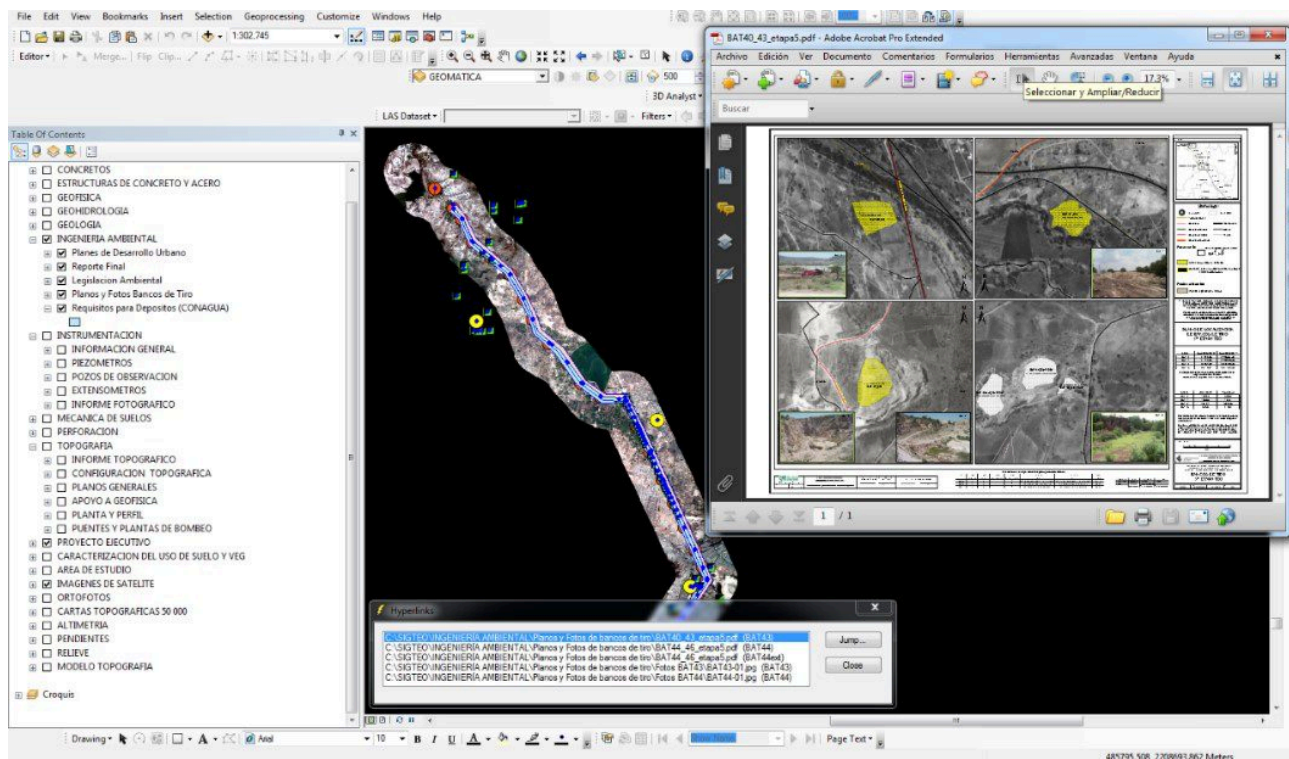


Figura 95. Ficha del banco de tiro BAT40_43 en el SIGTEO



Anexos

Anexo de entrevistas

Este anexo reúne los testimonios de personas que participaron en la construcción del Túnel Emisor Oriente. Las respuestas se transcriben tal como fueron enviadas, con correcciones mínimas de ortografía, y no se modifica su contenido técnico. Representan la experiencia del entrevistado y complementan, sin sustituir, la información documental de los capítulos.

Entrevista 1. Ing. Ricardo Reygadas, jefe de frente (ICA)

Contexto. El contacto se hizo a partir de un comentario del ingeniero en una publicación del grupo de Facebook de la ESIA Zacatenco, donde mencionó haber trabajado en la obra. El Ing. Ricardo Reygadas es egresado de la generación 2012-2017. Además de su trabajo en el frente, difundió en ese medio la convocatoria de ICA para contratar ingenieros civiles y arquitectos como jefes de frente del TEO, en la zona Ecatepec-Huehuetoca.

Modalidad. Cuestionario por escrito, respondido por mensaje el 14 de octubre de 2026.

DATO	RESPUESTA
Empresa y puesto	Jefe de frente en ICA
Periodo y tramo	2018, tramo de la lumbrera 19 a la 18
Actividades	Jefe de turno; seguimiento de los procesos de excavación; control de tiempos e insumos

¿Cómo describiría el proceso de construcción de las lumbreras y la instalación de la tuneladora? «Un proceso mecanizado, pero nunca era igual; siempre podías encontrar nuevas variantes y problemas al ir avanzando.»

¿Cuál fue el reto técnico más difícil y cómo se resolvió? «Cruzar mantos acuíferos, los cuales tenían tanta presión que atravesaban las dovelas de concreto, por lo que las lumbreras empezaban a inundarse y no se podía trabajar. Se resolvió inyectando entre dovelas y terreno espumas reactivas al agua, que se expandían y sellaban cualquier grieta.»

¿Cómo influyó el tipo de suelo en el avance? «Al llegar a zonas rocosas de gran resistencia tuvimos problemas, ya que el escudo no era capaz de romper la piedra; incluso el tornillo sin fin que extrae el material que va cortando el escudo llegó a romperse al atorarse piedras en él.»

¿Qué medidas de seguridad y de control de calidad se aplicaban? «Muchas medidas de seguridad; por decir pocas: revisión de eslingas para las maniobras, control de temperatura al fondo del túnel, pláticas de seguridad antes de comenzar la jornada y EPP siempre puesto, y laboratorio constante en muestreo de suelo y materiales.»

¿Por qué la obra tomó más tiempo y costo de lo previsto? «Al ser una obra de tal magnitud siempre van a haber problemas únicos, y esta no fue la excepción: por tipo de terreno, procesos mecanizados que a veces hay que cambiar, mejoras para optimizar tiempos, prueba y error en posibles soluciones para contrarrestar problemas; todo ello genera retrasos en el avance y, por lo tanto, en costos.»

¿Qué se habría hecho de manera diferente? «Un mejor estudio de suelos, para prevenir con tiempo el cambio de herramientas en la tuneladora para los distintos cortes que ocupaba el material.»

¿El TEO cumple la función para la que fue diseñado? «No me tocó estar en la apertura de la obra, pero sí debe de cumplir su función de desahogo de las aguas de la CDMX.»

¿Qué consejo daría a un estudiante de Ingeniería Civil? «No solo es la especialidad de túneles, es todo un mundo de ingeniería allá abajo; todo es importante y no debe hacerse menos: topografía, mecánica de suelos, calidad de materiales, costos, vías terrestres, todo es necesario para la correcta ejecución. Por lo que no te centres en una sola especialidad; nunca está de más conocer toda la ingeniería civil.»

Relación con la investigación. El testimonio coincide con lo documentado en los capítulos sobre geotecnia y proceso constructivo: las filtraciones bajo presión en suelos con acuíferos, el desgaste y las averías de las tuneladoras en los tramos con roca, y la necesidad de una exploración geotécnica más detallada antes de excavar. También ilustra cómo el cambio de herramienta de corte según el terreno influyó en los plazos y costos.



Figura 1. Túnel revestido con vías para el tren de servicio y líneas de servicio



Figura 2. Cambio de vía del tren de servicio dentro del túnel



Figura 3. Convocatoria de ICA para jefe de frente del Túnel Emisor Oriente

02

Entrevista 2. Ing. Luis Eduardo Guzmán Salgado, control de procesos de excavación (ICA)

Contexto. El contacto se hizo, como con el Ing. Reygadas, por medio del grupo de Facebook de la ESIA Zacatenco.

Modalidad. Cuestionario por escrito.

DATO	RESPUESTA
Empresa y puesto	Coordinador de Control de Procesos para la excavación de los tramos II y V, Ingenieros Civiles Asociados (ICA)
Periodo y tramo	2016 a 2020, construcción de los tramos II y V del túnel; para entonces todas las lumbreras ya estaban construidas
Cómo desea aparecer	Ing. Luis Eduardo Guzmán Salgado, control de procesos para la excavación del Tramo V del Túnel Emisor Oriente

¿Cuáles eran sus principales actividades dentro de la obra? «Entre las principales actividades del área de Control de Procesos estaban las siguientes:

- Monitoreo de parámetros de excavación de las máquinas tuneladoras (TBM tipo EPB), validando que se encontraran dentro de los rangos de trabajo establecidos por los fabricantes de las máquinas, Robbins y Herrenknecht. El monitoreo en tiempo real de los parámetros durante la excavación y la verificación de consumos de espuma, aceites de lubricación y grout de inyección para el espacio anular entre dovela y terreno natural. Además, la preparación de reportes de parámetros por turno para la Gerencia de Proyecto.
- Actualización de los perfiles geotécnicos del trazo del túnel conforme al avance de la excavación, así como con la información obtenida de sondeos de exploración directa y de la instalación de piezómetros sobre el eje del túnel.
- Caracterización geotécnica del frente de excavación mediante ingresos a la cámara de excavación de las TBM para clasificar el tipo de suelo y roca del frente, así como estimar el flujo proveniente de mantos acuíferos. Elaboración de esquemas representativos del frente de excavación para la toma de decisiones con respecto a las herramientas necesarias para la rueda de corte.
- Análisis estadístico de los parámetros de excavación con respecto al tipo de material (suelo y roca) que se estaba excavando en ese momento, para la toma de decisiones que permitieran cumplir los rendimientos de excavación y la terminación del proyecto esperados.
- Como actividades secundarias: seguimiento a la construcción de piezómetros de cámara abierta, medición de instrumentación como sistemas de convergencias, así como la ejecución de casetas de vigilancia de lumbreras del tramo II.»

¿Cómo describiría el proceso de construcción de las lumbreras y la instalación de la tuneladora? «El proceso de construcción de las lumbreras utilizó las técnicas más innovadoras de ese momento, además de tomar como referencia procedimientos constructivos de otros túneles que estaban en fase de construcción en esos momentos o que se habían efectuado en años anteriores en el mismo tipo de suelo, tanto de la CDMX como del Estado de México. Se utilizaron equipos innovadores, sistemas y tecnología de

última generación para la construcción de lumbreras flotadas que permitieran mantener la estabilidad del suelo a profundidades de hasta 130-150 m, en el caso de las lumbreras 17 o 19 en Huehuetoca, Estado de México.

Por otra parte, las fases de bajada y puesta en marcha de las tuneladoras fueron un reto complejo, derivado de las dimensiones tanto del diámetro como del tren de equipo (back up) que alojaba los compresores, sistemas de inyección, sistemas de descarga de rezaga, así como el erector de dovelas y sistemas auxiliares para la excavación del túnel. Fue un reto diferente en cada lumbrera de acceso donde se bajaba una TBM, derivado de los equipos necesarios para alcanzar a bajar los componentes a determinada profundidad y con el tonelaje de cada componente, además de las maniobras específicas que demandaban los componentes con respecto a los diámetros de las lumbreras.»

¿Cuál fue el reto técnico más difícil y cómo se resolvió? «Uno de los retos más importantes durante la construcción del Túnel Emisor Oriente fueron las intervenciones atmosféricas a la cámara de excavación de las máquinas TBM, donde importantes caudales de agua provenientes de mantos freáticos entraban a la zona donde el material excavado es procesado para su posterior rezaga, y a la que era posible acceder únicamente mediante paros programados. Como parte de mis funciones principales se encontraba la cuantificación de herramientas de corte y su clasificación, además de emitir una clasificación del terreno presente en el frente de excavación. Los retos se presentaron en el tramo V, en la excavación de la lumbrera 19 a la lumbrera 18, donde se excavó un terreno mixto, en ocasiones con presencia completa de basalto fracturado en el frente de excavación, que complicaba el avance de la TBM, provocaba taponamientos en el tornillo sinfín para el desalojo del material producto de la excavación y que adicionalmente demandaba cambios constantes de herramientas de corte, derivado de la alta abrasividad de la roca.»

¿Cómo influyó el tipo de suelo en el avance? «El tipo de suelo influyó en el rendimiento de excavación proyectado para las máquinas TBM, que fueron diseñadas para excavación en suelos blandos, caso contrario al material encontrado en los tramos IV, V y VI, donde la presencia de suelos mixtos era constante, además de flujos hidráulicos que no estaban previstos; situaciones que retrasaron la conclusión del proyecto. La ingeniería básica y de

detalle del proyecto contempló una cantidad limitada de sondeos de exploración directa y la interpretación se llevó a cabo principalmente por medio de cartas geológicas, lo que limitó la capacidad de adecuar las máquinas para el tipo de suelo que sería excavado.»

¿Qué medidas de seguridad y de control de calidad se aplicaban? «Las medidas de seguridad eran diferentes en todos los procesos: para la excavación de lumbreras (dependiendo del tipo de construcción de la lumbrera), para el traslado de componentes de las tuneladoras entre lumbreras, para su ensamble y mantenimiento en superficie, para el descenso de componentes al fondo de la lumbrera, para los arranques de excavación y para la excavación propiamente. Una de las ventajas que ofrece la excavación de túneles de forma mecanizada es la capacidad de soportar el terreno por medio de la rueda de corte, lo que garantizaba la estabilidad del frente de excavación, además del escudo, que permitía la estabilidad de las tablas para posteriormente colocar las dovelas de concreto reforzado. Las medidas de seguridad se implementaron con base en el análisis de riesgo de cada actividad, tomando en todo momento las previsiones necesarias para evitar accidentes.»

¿Por qué la obra tomó más tiempo y costo de lo previsto? «El proyecto tomó más tiempo de lo previsto por diferentes causas raíz, asociadas a la limitación de la ingeniería básica y de detalle del proyecto, la cual no contemplaba particularidades importantes como el tipo de suelo y los caudales provenientes de mantos acuíferos, además de las limitantes de diseño de las máquinas TBM adquiridas y las adecuaciones posteriores que tuvieron que realizarse. A ello se suman instalaciones adicionales que fueron necesarias para el funcionamiento del túnel, como la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Hidalgo.»

¿Qué se habría hecho de manera diferente? «Tomando como base la experiencia adquirida en este proyecto y en otros túneles construidos con máquinas tuneladoras en suelos lacustres de la CDMX y dentro de la República Mexicana, considero que los fabricantes de tuneladoras han tomado experiencias previas y capitalizado el aprendizaje para mejorar aspectos técnicos para la excavación de diversos suelos con la misma máquina. Por otra parte, destaca la relevancia de contar con un proyecto de ingeniería

básica y de detalle integral, que considerara diversos sondeos y proyecciones del tipo de material, así como posibilidades de cambio de trazo, y que finalmente evaluara las obras complementarias necesarias para la excavación.»

¿El TEO cumple la función para la que fue diseñado? «El Túnel Emisor Oriente cumple con la función de desalojar aguas residuales provenientes de la zona oriente de la Ciudad de México, con una capacidad de hasta 150 m³ por segundo. Es una de las obras de infraestructura más representativas de la actualidad, no solo por la tecnología con la que fue construido, sino por sus dimensiones de 62 km de longitud y 8 m de diámetro, además de las lumbreras de paso y servicio que existen, los cárcamos de rebombeo y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales que forma parte del proyecto.»

¿Qué consejo daría a un estudiante de Ingeniería Civil? «Dentro del área de construcción se ha denominado obra civil pesada a la construcción de obras de infraestructura de grandes dimensiones, como lo es un túnel de aguas residuales de las dimensiones del TEO. Uno de los consejos que podría externar es que son obras que demandan profesionales comprometidos, preparados profesionalmente y dispuestos a la interacción con otras disciplinas como geología, topografía, ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, etc. Además, representan retos técnicos de gran impacto que requieren soluciones integrales que consideren aspectos como la seguridad industrial, la optimización de recursos y el cumplimiento de los rendimientos proyectados. Una vez concluidos, los proyectos de este tipo generan experiencias profesionales muy enriquecedoras que abren puertas y oportunidades a nivel mundial.»

Relación con la investigación. El testimonio coincide con el de la entrevista 1 en el tramo de la lumbrera 19 a la 18: terreno mixto con basalto fracturado, atascos del tornillo sinfín y cambios frecuentes de herramienta de corte. Ambos señalan como causa del retraso una exploración directa limitada, apoyada sobre todo en cartas geológicas, lo que concuerda con los capítulos de geología y de excavación. El diámetro de 8 m que menciona el entrevistado corresponde al exterior de la excavación; el diámetro interior terminado documentado es de 7.0 m (capítulo 9).



Anexos

Acervo fotográfico de Fundación ICA

Este anexo reúne fotografías de la construcción del Túnel Emisor Oriente que forman parte del Acervo Histórico de Fundación ICA, fondo Colección ICA 2008-2020. Las imágenes conservan la marca de agua de la fundación. Los pies describen únicamente lo que se ve en cada fotografía; el acervo no indica la lumbrera, el tramo ni la fecha de cada toma.

01

Patios y fabricación de dovelas

Las dovelas se fabricaron en planta y se almacenaron en patios a cielo abierto antes de llevarlas a las lumbreras (capítulos 13 y 16).



Figura 1. Vista general de un patio de dovelas apiladas por tipo



Figura 2. Dovelas apiladas en un patio a cielo abierto

02

Construcción de lumbreras

Las lumbreras se construyeron antes que el túnel y sirvieron para bajar las tuneladoras, el equipo y la rezaga (capítulo 15).



Figura 3. Brocal de una lumbrera en construcción con bomba de concreto



Figura 4. Perforadora rotatoria en la superficie de una lumbrera



Figura 5. Vista desde el brocal de una lumbrera con el armado de acero en sus paredes



Figura 6. Fondo de lumbrera con la losa armada y personal trabajando



Figura 7. Vista hacia el fondo de una lumbrera terminada con maquinaria en la base



Figura 8. Fondo de lumbrera con excavadora



Figura 9. Vista hacia el fondo de una lumbrera revestida



Figura 10. Patio de maniobras de una lumbrera con grúa pórtico

03

Tuneladoras y equipo

Seis tuneladoras EPB excavaron el túnel; aquí se ven la rueda de corte, el interior del escudo y el tren de equipo (capítulo 14).



Figura 11. Rueda de corte de una tuneladora en taller antes de su envío



Figura 12. Interior de una lumbrera con plataformas y escaleras de trabajo



Figura 13. Vista hacia arriba desde el fondo de una lumbrera con la cabeza de la tuneladora



Figura 14. Vista hacia arriba en una lumbrera con estructura metálica



Figura 15. Interior del escudo de la tuneladora

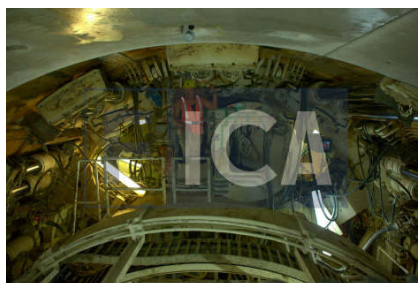


Figura 16. Interior del escudo con cilindros de empuje y sistemas hidráulicos



Figura 17. Personal junto al erector de dovelas

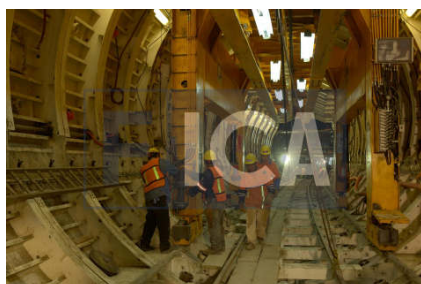


Figura 18. Tren de equipo de la tuneladora con personal

04

El túnel revestido

El túnel terminado de dovelas, con las vías del tren de servicio y el ducto de ventilación de la obra (capítulos 14 y 16).



Figura 19. Túnel revestido con vía del tren de servicio y ducto de ventilación



Figura 20. Túnel revestido con vías y tuberías de servicio



Figura 21. Tramo de túnel con vías y ducto de ventilación en la clave



Figura 22. Túnel revestido con personal caminando

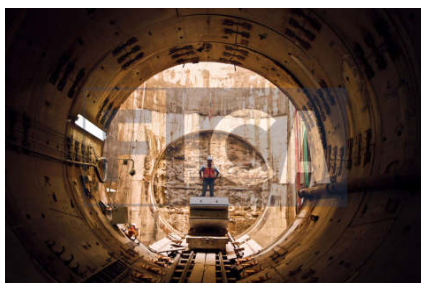


Figura 23. Túnel con personal sobre una plataforma al fondo



Figura 24. Túnel revestido iluminado



Figura 25. Tramo de túnel con una canastilla de servicio



Figura 26. Interior de un conducto con iluminación roja