



Parte II · La línea de conducción del TEO

17

Funcionamiento de la línea de conducción

Gasto, pendiente, dispositivos de control y eficiencia del TEO

El TEO es una línea de conducción por gravedad: 62.4 km de túnel circular de 7.0 m que lleva aguas residuales y pluviales de la lumbrera L-0 al río El Salto. Con la ecuación de Manning cabe más de lo que se pidió, hasta unos 185 m³/s con $n = 0.013$. El límite real no está en el túnel, sino en el río que recibe el agua y en el estado del revestimiento.



Figura 17.1. Modelo físico para el manejo de caudales a la salida del TEO

Este capítulo reúne la conducción, la eficiencia del tipo de obra y la operación y el mantenimiento. La clasificación de las líneas de conducción por fluido y los materiales de tubería están en los capítulos 2 y 6, y las ecuaciones de pérdidas, los dispositivos de control y la eficiencia, en el 7; aquí solo se usan. Los cálculos que no provienen de una fuente se indican como cálculo propio.

01

El TEO como línea de conducción

QUÉ CONDUCE Y CÓMO

El TEO es un conducto circular profundo, revestido con dovelas y concreto, que trabaja a superficie libre y por gravedad. Recibe aguas residuales y pluviales en la L-0, en el límite entre la Ciudad de México y el Estado de México, y en captaciones intermedias, y las

entrega en el río El Salto, en Hidalgo. Es un emisor de un sistema combinado: en estiaje lleva aguas negras y en lluvias recibe las avenidas del Gran Canal, del Túnel Interceptor Río de los Remedios (TIRR) y de otras estructuras.

El diámetro no salió de un cálculo libre. En el drenaje profundo se elige según el escudo disponible: en el Túnel Semiprofundo Gran Canal se disponía de escudos de 5.00 y 3.10 m terminados y de un gasto de diseño de 35 m³/s, y se adoptó el de 3.10 m ajustando la pendiente para que pasara el gasto. El criterio es el mismo en el TEO: fijar el diámetro por razones constructivas y buscar la pendiente que haga pasar el gasto.

Los túneles del drenaje profundo escalan en diámetro con el tiempo: 3.1 m en los interceptores semiprofundos, 4 y 5 m en los interceptores, 6.5 m en el Emisor Central y 7 m o más en los dos emisores nuevos. El TEO, con 7.0 m, 62 km y 150 m³/s de proyecto, es el más largo de la lista.



Figura 17.2. Esquema de los elementos hidráulicos del sistema de drenaje del Valle de México

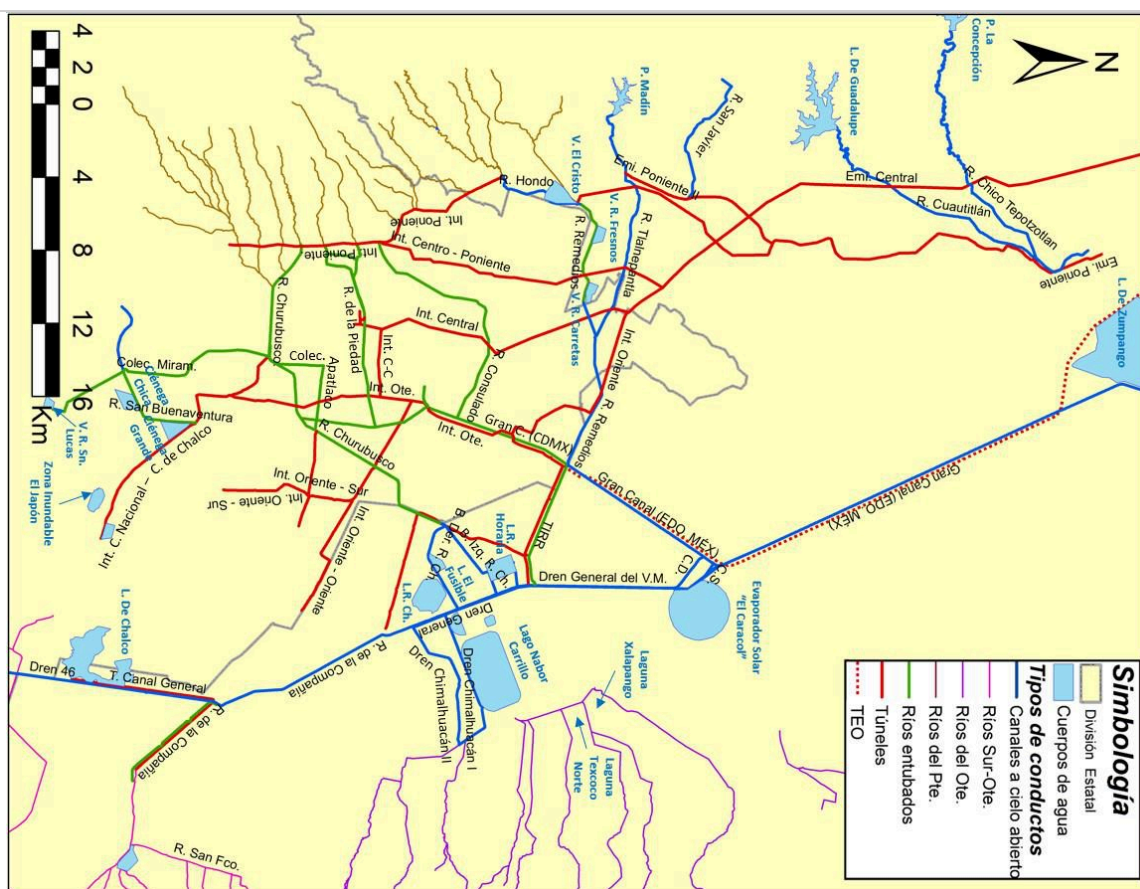


Figura 17.3. Sistema Principal de Drenaje del Valle de México usado para modelar el TEO

DATOS HIDRÁULICOS DE PARTIDA

La tabla 17.1 reúne los datos hidráulicos del TEO.

TABLA 17.1. DATOS HIDRÁULICOS DEL TEO

CONCEPTO	VALOR
Diámetro interior terminado	7.0 m
Longitud	62.4 km
Gasto de proyecto en avenidas	150 m³/s
Gasto de las pruebas en el modelo físico	170 m³/s
Gasto esperado en estiaje	hasta 50 m³/s, con derivación posible a la PTAR de Atotonilco
Pendiente de L-0 a L-6 (primeros 11 km)	0.19 % (1.9 m/km)
Pendiente de L-6 al portal	0.16 %

CONCEPTO	VALOR
Pendiente a largo plazo del primer tramo	1.515 m/km, tras absorber 50 años de hundimientos
Nivel de plantilla en el portal de salida	2,106 msnm
Cadenamiento del portal de salida	61+802.948
Cota de la clave en el portal	2,113 msnm
Coeficiente de Manning en la modelación del Emisor Poniente	0.013

Para calcular la capacidad se evalúan cuatro valores del coeficiente de rugosidad n , del más liso (0.012) al de un revestimiento deteriorado (0.016), y se declara cuál se usa en cada resultado.

POR QUÉ LA PENDIENTE NO ES UNIFORME

El tramo inicial de 11 km (L-0 a L-6) se trazó con 1.9 m/km, más de lo que hoy se requiere, para que en 50 años, con los hundimientos regionales, quedara con 1.515 m/km, valor con el que se conducen 150 m³/s con 7.0 m de diámetro. La zona lacustre en que nace el TEO se hunde de 8 a 12 cm al año en promedio; una pendiente inicial de sobra funciona como reserva. La alternativa descartada es la de los conductos superficiales, como el Gran Canal, que perdieron pendiente con los hundimientos.

Con las cotas de fondo y las coordenadas de los nodos de la modelación SWMM se puede comprobar el orden de magnitud. Entre TEOL0A (2,203.99 msnm) y TEO4 (2,188.40 msnm) hay 7,830 m en línea recta y 15.59 m de desnivel. La pendiente media es

$$S = \frac{\Delta z}{L} = \frac{2203.99 - 2188.40}{7830} = 0.0020$$

donde Δz es el desnivel entre nodos en metros, L es la distancia en planta entre nodos en metros y S es la pendiente adimensional. Por tramos resultan 0.0022 (TEOL0A-TEO1A), 0.0019 (TEO1A-TEO3) y 0.0019 (TEO3-TEO4). Las distancias son entre nodos y no cadenamientos reales, por lo que el valor es indicativo (cálculo propio).

Un segundo control cierra el perfil. Desde la plantilla del portal (2,106 msnm), con 11 km a 1.9 m/km y 51.4 km a 1.6 m/km, la plantilla en L-0 resulta

$$z_{L0} = 2106 + 11 \times 1.9 + 51.4 \times 1.6 = 2106 + 20.9 + 82.2 \approx 2209 \text{ msnm}$$

donde z_{L0} es la cota de plantilla en L-0 en msnm y las longitudes están en km. Con 1.515 m/km en el primer tramo da unos 2,205 msnm. Ambos valores son congruentes con los 2,204 msnm de L-0 que usa el modelo esquemático del proyecto (cálculo propio).

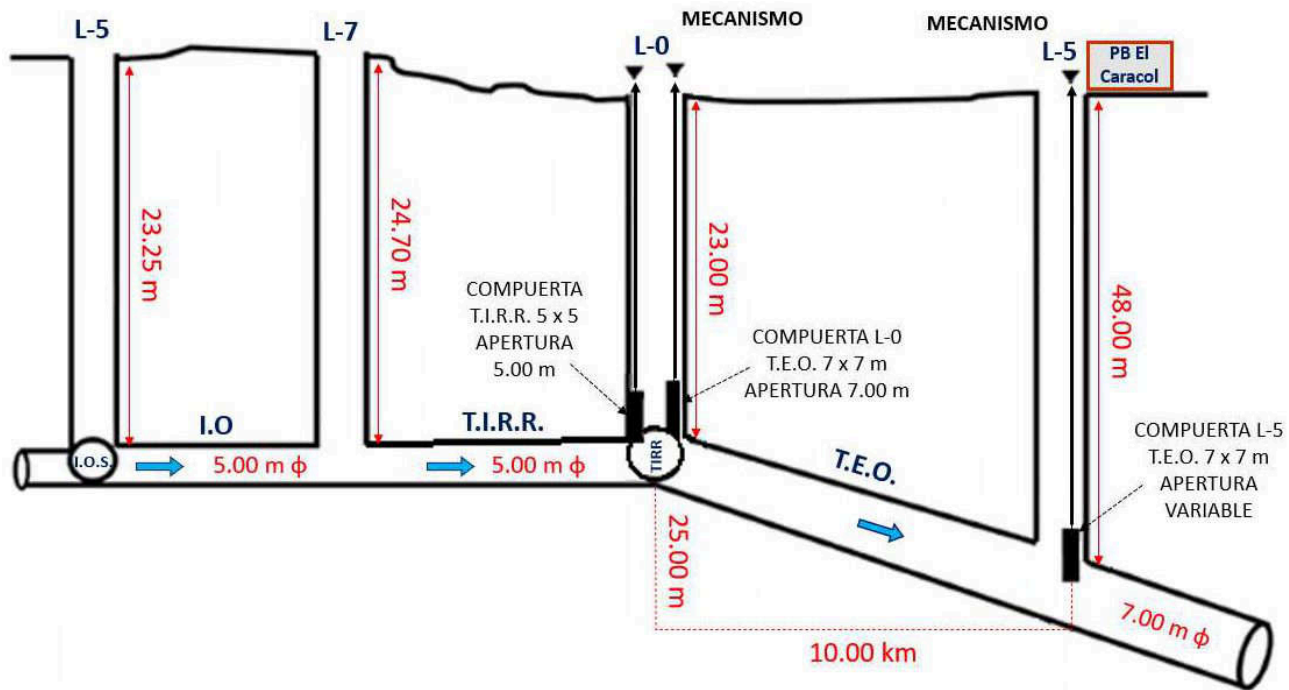


Figura 17.4. Perfil de las lumbreras L-0 y L-5 con sus compuertas

02

Capacidad hidráulica con Manning, paso a paso

Esta sección calcula qué gasto cabe en la sección circular de 7.0 m trabajando a superficie libre. Todo el cálculo es propio y está hecho con los datos de la tabla 17.1.

ECUACIONES Y SUPUESTOS

La ecuación de Manning para flujo uniforme es

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

donde Q es el gasto en m^3/s , n el coeficiente de rugosidad de Manning en $\text{s}/\text{m}^{1/3}$, A el área hidráulica en m^2 , $R = A/P$ el radio hidráulico en m (con P el perímetro mojado en m) y S la pendiente de la plantilla, adimensional.

Para una sección circular de diámetro D con tirante y , el ángulo central y las propiedades geométricas son

$$\theta = 2 \arccos \left(1 - \frac{2y}{D} \right), \quad A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin \theta), \quad P = \frac{D \theta}{2}$$

donde θ es el ángulo central en radianes, D el diámetro en m y y el tirante en m. A tubo lleno $\theta = 2\pi$.

Los supuestos son tres. Primero, la pendiente de cálculo es $S = 0.0016$, la del tramo de L-6 al portal, la más baja del trazo; se evalúan también 0.00152 y 0.0019. Segundo, n vale 0.013 en el caso base, como en la modelación del túnel del Emisor Poniente, con 0.012 y 0.014 como variaciones y 0.016 como caso de deterioro, tomado de la reducción de capacidad que Morales Muñoz (2014, p. 78) reporta en el Emisor Central. Tercero, el flujo es uniforme y permanente, sin pérdidas locales en lumbreras. Los valores de n y S son supuestos de cálculo, no datos de diseño del TEO.

TUBO LLENO

Con $D = 7.0$ m:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (7.0)^2}{4} = 38.48 \text{ m}^2, \quad R = \frac{D}{4} = 1.75 \text{ m}$$

Con $n = 0.013$ y $S = 0.0016$:

$$Q_{\text{lleno}} = \frac{1}{0.013} (38.48) (1.75)^{2/3} (0.0016)^{1/2} = \frac{38.48 \times 1.4522 \times 0.04}{0.013} = 172.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

donde $(1.75)^{2/3} = 1.4522$ y $(0.0016)^{1/2} = 0.04$. La velocidad a tubo lleno es

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{172.0}{38.48} = 4.47 \text{ m/s}$$

con V en m/s.

VERIFICACIÓN DEL MÉTODO CON EL EMISOR CENTRAL

Antes de usar el método en el TEO se comprobó con un caso documentado: el Emisor Central, con $D = 6.5$ m, $S = 0.00195$ y $n = 0.010$, da a tubo lleno $Q = 202.5$ m³/s y $V = 6.10$ m/s, con un máximo de 217.9 m³/s cuando $y/D = 0.94$. El cálculo propio reproduce esos valores, por lo que el procedimiento es correcto.

TABLA 17.2. VERIFICACIÓN: EMISOR CENTRAL, MANNING CON $N = 0.010$

Y/D	A (M ²)	R (M)	Q (M ³ /S)	V (M/S)
0.50	16.59	1.625	101.3	6.10
0.75	26.69	1.961	184.7	6.92
0.90	31.46	1.937	215.9	6.86
0.94	32.37	1.882	217.9	6.73
1.00	33.18	1.625	202.5	6.10

El gasto máximo ocurre con el túnel al 94 % de llenado y no a tubo lleno: pasado ese punto el perímetro mojado crece más rápido que el área y la capacidad baja. Un túnel que entra en carga conduce ligeramente menos que uno casi lleno.

CAPACIDAD DEL TEO

Para $y/D = 0.94$ en el TEO, $\theta = 2 \arccos(1 - 1.88) = 2 \arccos(-0.88) = 5.2933$ rad, de modo que

$$A = \frac{7.0^2}{8} (5.2933 - \sin 5.2933) = 6.125 (5.2933 + 0.8360) = 37.54 \text{ m}^2, \quad P = \frac{7.0 \times 5.2933}{2} = 18.53 \text{ m}$$

$$R = \frac{37.54}{18.53} = 2.026 \text{ m}, \quad Q_{max} = \frac{1}{0.013} (37.54)(2.026)^{2/3}(0.04) = 185.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

La tabla 17.3 resume el resto de combinaciones.

TABLA 17.3. CAPACIDAD DEL TEO ($D = 7.0$ M) SEGÚN PENDIENTE Y RUGOSIDAD

S	N	Q A TUBO LLENO (M ³ /S)	Q MÁXIMO, $Y/D = 0.94$ (M ³ /S)	V A TUBO LLENO (M/S)
0.00152	0.012	181.6	195.3	4.72
0.00152	0.013	167.6	180.3	4.36
0.00152	0.014	155.6	167.4	4.04
0.00152	0.016	136.2	146.5	3.54

S	N	Q A TUBO LLENO (M ³ /S)	Q MÁXIMO, Y/D = 0.94 (M ³ /S)	V A TUBO LLENO (M/S)
0.0016	0.012	186.3	200.4	4.84
0.0016	0.013	172.0	185.0	4.47
0.0016	0.014	159.7	171.8	4.15
0.0016	0.016	139.7	150.3	3.63
0.0019	0.013	187.4	201.6	4.87
0.0019	0.016	152.3	163.8	3.96

Con $n = 0.013$ y la pendiente más baja del trazo, el TEO conduce de 180 a 185 m³/s como máximo, un margen de 20 a 23 % sobre los 150 m³/s de proyecto. Con $n = 0.016$ la capacidad cae a unos 146-150 m³/s y el margen desaparece. Es la lección del Emisor Central: la rugosidad deteriorada recorta la capacidad, de modo que el mantenimiento del revestimiento es una decisión hidráulica y no solo estructural. Los 170 m³/s del modelo físico caben en el túnel solo si n es 0.014 o menor con $S = 0.0016$, así que fueron un margen para la obra de descarga y no el gasto de proyecto del túnel (inferencia).

TIRANTE, VELOCIDAD Y NÚMERO DE FROUDE

Para saber cómo trabaja el túnel con un gasto dado hay que resolver la ecuación de Manning para el tirante. No tiene solución cerrada: se itera sobre y/D hasta que $Q(y/D)$ iguala el gasto buscado. Para 150 m³/s, $n = 0.013$ y $S = 0.0016$:

1. Con $y/D = 0.72$, $\theta = 4.0528$ rad, $A = 29.66$ m², $P = 14.18$ m, $R = 2.091$ m y $Q = 149.3$ m³/s.
2. Con $y/D = 0.723$, $\theta = 4.0662$ rad, $A = 29.80$ m², $P = 14.23$ m, $R = 2.094$ m y $Q = 150.0$ m³/s.
3. El tirante es entonces $y = 0.723 \times 7.0 = 5.06$ m y la velocidad

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{150}{29.80} = 5.04 \text{ m/s}$$

El número de Froude indica si el flujo es subcrítico (menor que 1) o supercrítico:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gA/T}}, \quad T = D \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = 7.0 \sin(2.033) = 6.27 \text{ m}, \quad Fr = \frac{5.04}{\sqrt{9.81 \times 29.80/6.27}} = 0.74$$

donde g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 , T el ancho de la superficie libre en m y A/T el tirante hidráulico en m.

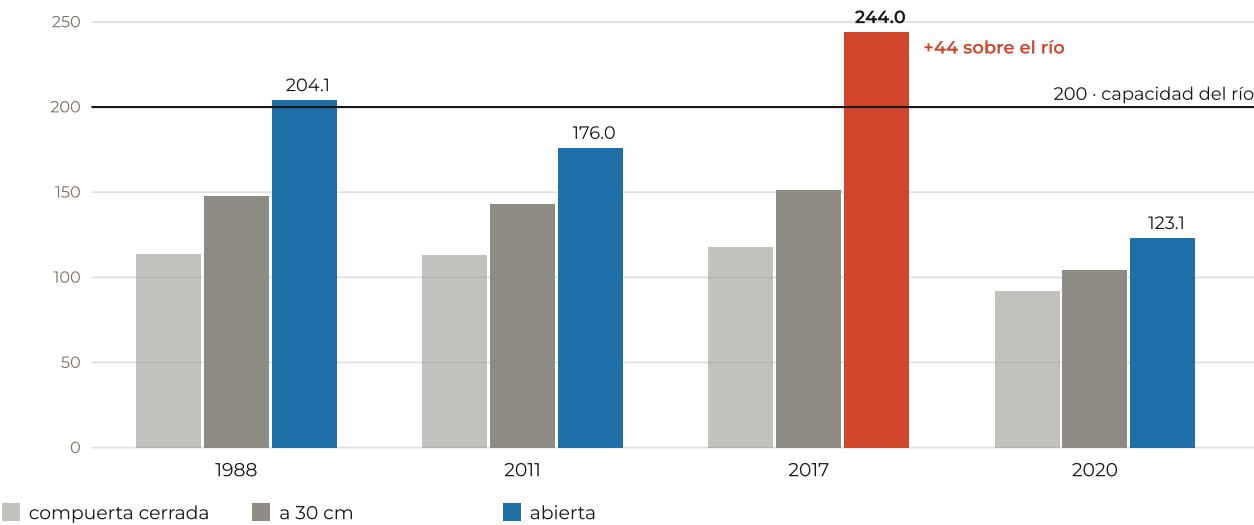
TABLA 17.4. FLUJO UNIFORME EN EL TEO PARA DISTINTOS GASTOS (N = 0.013)

S	Q (M ³ /S)	Y/D	TIRANTE Y (M)	V (M/S)	FROUDE
0.0016	50 (estiaje)	0.369	2.59	3.87	0.89
0.0016	100	0.548	3.83	4.64	0.84
0.0016	150 (proyecto)	0.723	5.06	5.04	0.74
0.0016	170	0.809	5.67	5.09	0.66
0.0019	50	0.353	2.47	4.12	0.98
0.0019	150	0.677	4.74	5.41	0.84

Se leen tres cosas en la tabla (cálculo propio). Con 150 m³/s el túnel trabaja al 68-72 % de su altura y deja de 1.9 a 2.3 m libres sobre el agua; ese espacio es el colchón de aire para los gases y para el aire que desplazan los frentes de avenida. En estiaje, con 50 m³/s, la velocidad es de 3.9 a 4.1 m/s, suficiente para arrastrar sólidos, así que no hay sedimentación por baja velocidad. Y en el tramo de 1.9 m/km con 50 m³/s el Froude es 0.98, casi crítico; cerca de $Fr = 1$ la superficie libre es inestable y pueden formarse ondulaciones, un punto que conviene observar en la operación (inferencia).

TEO y Emisor Central juntos: gasto máximo de salida

m³/s según la posición de la compuerta de L-5, en cuatro tormentas



Elaboración propia con datos de Vázquez Martínez (2021, pp. 144-145, tablas 8.2 a 8.4).

Figura 17.5. Capacidad máxima del TEO según el coeficiente de rugosidad

TIEMPO DE TRÁNSITO Y PÉRDIDA DE ENERGÍA

Con velocidades de 4 a 5 m/s, una partícula tarda en recorrer los 62.4 km

$$t = \frac{L}{V} = \frac{62\,400}{5.0} = 12\,480 \text{ s} = 3.5 \text{ h}, \quad t = \frac{62\,400}{4.0} = 15\,600 \text{ s} = 4.3 \text{ h}$$

donde L es la longitud en m, V la velocidad en m/s y t el tiempo en s. Ésa es la ventana con la que cuentan los operadores del portal para reaccionar ante una avenida que entra por L-0 (cálculo propio).

La pérdida por fricción a tubo lleno con 150 m³/s ($V = 3.90$ m/s, $R = 1.75$ m) sale de despejar la pendiente de fricción de Manning:

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{(0.013)^2 (3.90)^2}{(1.75)^{4/3}} = \frac{0.002570}{2.107} = 0.00122$$

donde S_f es la pérdida de energía por metro de conducto, adimensional, es decir 1.22 m por kilómetro. Con $n = 0.012$ resultan 1.04 m/km y con $n = 0.016$, 1.84 m/km. Hazen-Williams con C entre 140 y 100 da de 0.93 a 1.73 m/km, y Darcy-Weisbach con rugosidad absoluta de 0.3 a 3 mm (Colebrook, viscosidad de 10^{-6} m²/s) da de 1.15 a 1.79 m/km (cálculo propio). Las tres familias coinciden: con rugosidades razonables de concreto, la pérdida a tubo lleno está entre 0.9 y 1.8 m/km.

Como el túnel baja de 1.5 a 1.9 m/km, la línea de energía a tubo lleno con 150 m³/s apenas cabe en el desnivel de la plantilla. El túnel conduce su gasto sin entrar en carga y la carga aparece cuando hay un control aguas abajo, como el río El Salto o la compuerta de L-5.

Dato técnico: como muestra de la sensibilidad al coeficiente, el Emisor Central con Hazen-Williams conduce 210.7 m³/s con $C = 160$ y 158.0 m³/s con $C = 120$, una diferencia cercana a 25 %.

03

Captaciones y compuertas de la línea

DÓNDE ENTRA EL AGUA

En la L-0 se unen el Gran Canal, el TIRR y el embovedamiento del río de los Remedios. Además hay aportaciones urbanas directas en las lumbreras L-1A, L-3 y L-4.

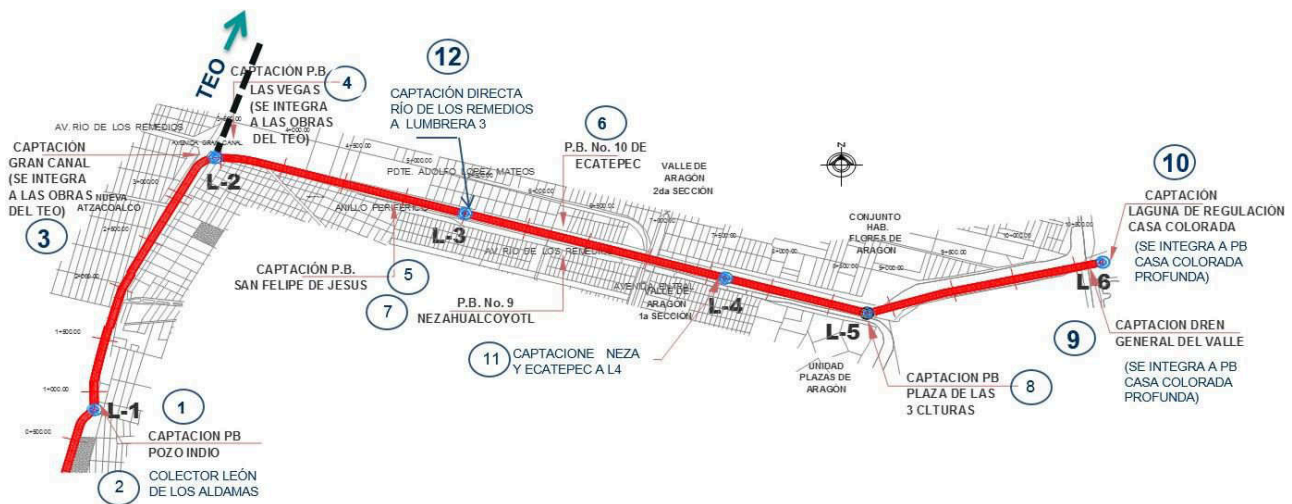


Figura 17.6. Captaciones del primer tramo del TEO y del TIRR, de L-1 a L-6

TABLA 17.5. CAPTACIONES Y ESTRUCTURAS DE INGRESO DEL PRIMER TRAMO DEL TEO

ESTRUCTURA	UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
Compuerta TIRR-L-0	L-0	5 × 5 m; regula los gastos del TIRR
Compuerta L-0-TEO	L-0	7 × 7 m; regula gastos del Gran Canal y del TIRR hacia el TEO
Dos compuertas Gran Canal-L-0	L-0	4.5 × 4.5 m cada una; en el modelo se consideran totalmente abiertas
Captaciones urbanas	L-1A, L-3, L-4	Aportaciones de subcuencas urbanas
Captación directa del río de los Remedios	L-3	Indicada en la ilustración 3.9 de la tesis
Captaciones de Nezahualcóyotl y Ecatepec	L-4	Zonas inundables que descargan al TIRR y al tramo 1 del TEO

ESTRUCTURA	UBICACIÓN	OBSERVACIÓN
Compuerta de L-5	L-5	7 × 7 m, apertura variable; regula el gasto hacia el río El Salto
Planta de bombeo El Caracol	L-5	40 m ³ /s instalados
Compuertas de la L-6 del TIRR	L-6	6 × 2 m, en las captaciones del Dren General del Valle

Como referencia, el drenaje profundo usa desde 1975 un esquema típico de captación con ocho componentes: colector madrina, caja de control, canal de transición, lumbrera adosada, conductos de desfogue, estructura amortiguadora, túnel profundo y lumbrera constructiva. El colector madrina se excava con muro Milán hasta 10 a 12 m y con escudo si es más profundo. La caja de control tiene dos juegos de compuertas con vertedores para derramar los excesos de tormentas imprevistas en estiaje. La lumbrera adosada disipa la energía de la caída y descarga al túnel por uno o dos tubos horizontales. Para cajas de más de 7 m de profundidad recomienda sección circular.

Se comparan cinco tipos de conexión: cámara en espiral, caída con diafragmas o en cascada, caída libre con tubos de desfogue, caída libre con estructura amortiguadora y caída con ranura vertical. La regla es de dos vías. Si interesa el funcionamiento hidráulico de la lumbrera de caída, conviene cámara en espiral o ranura vertical; si interesa el funcionamiento de la red superficial, conviene la caída libre, porque la cámara en espiral puede ahogar el colector de alimentación. La caída en cascada se abandonó por obturación de orificios y vulnerabilidad al impacto, y en caídas de más de 20 m las presiones en la losa de fondo de la caída libre resultaron poco importantes.

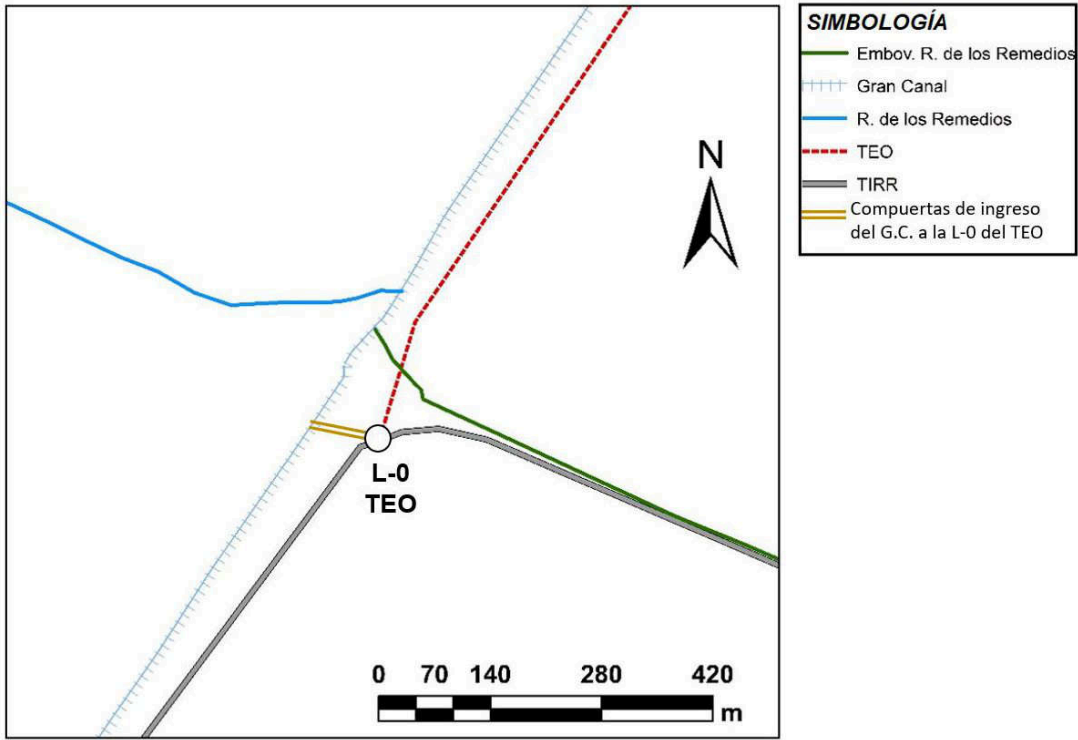


Figura 17.7. Confluencia de conductos y canales en la lumbrera L-0

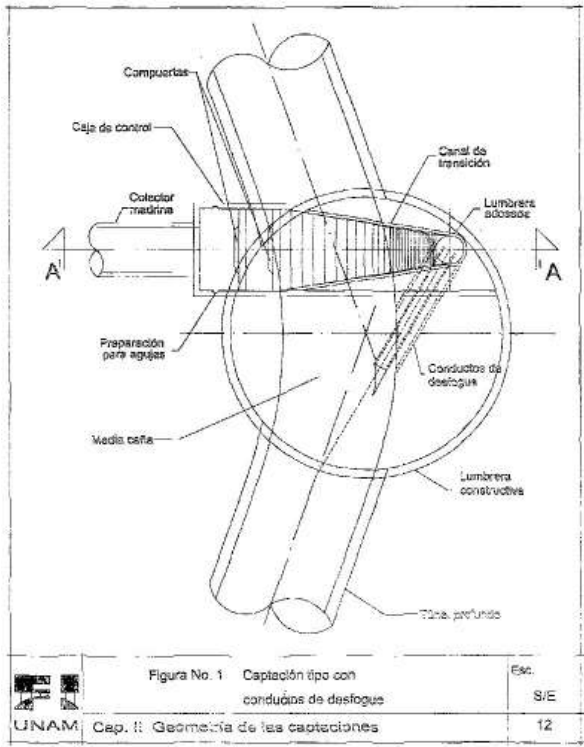


Figura 17.8. Captación típica del drenaje profundo con conductos de desfogue

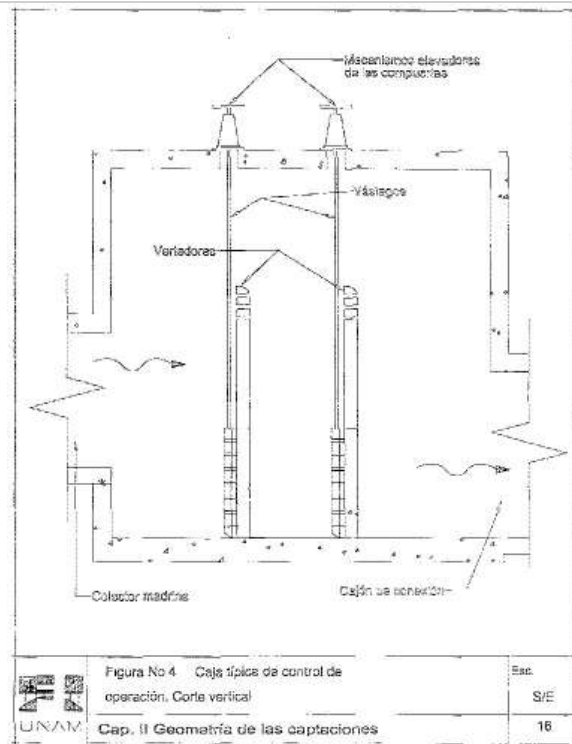


Figura 17.9. Caja de control de operación en corte vertical

LAS COMPUERTAS DE L-0 Y L-5

El control de la conducción se concentra en tres puntos: las compuertas de entrada en L-0, la compuerta de L-5 y las del portal de salida. Las dos primeras determinan cuánta agua entra y cuánta sale hacia Tula; la tercera reparte entre el río y el canal (sección 13).

La compuerta de 7×7 m de L-5 tiene doble función. Regula el gasto aguas abajo y permite subir el tirante en L-5 para reducir la altura de bombeo de El Caracol, porque la lumbrera tiene 48.72 m de profundidad y la planta tiene 40 m³/s instalados. La potencia hidráulica de bombeo es

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} = \frac{1000 \times 9.81 \times 40 \times 48.72}{0.75} = 25.5 \times 10^6 \text{ W} = 25.5 \text{ MW}$$

donde ρ es la densidad del agua en kg/m³, Q el gasto en m³/s, H la altura de elevación en m, η la eficiencia (0.75, supuesto) y P la potencia en W. Cada metro de tirante que se gane en L-5 baja esa potencia en proporción, y ésa es la razón técnica por la que la compuerta participa en la operación diaria y no solo en el control de avenidas.

La modelación probó tres condiciones de la compuerta de L-5: totalmente cerrada, que fue la condición operativa de 2017; castigada a 30-35 cm de apertura; y totalmente abierta.

Un problema operativo señalado en la modelación es que las compuertas de L-0 trabajan con apertura parcial, lo que podría generar vibraciones cuando las lumbreras entran en carga, y lo mismo podría ocurrir en L-5. La recomendación es evitar aperturas parciales de compuertas tan grandes, manejarlas totalmente abiertas o cerradas y regular las incorporaciones aguas arriba con compuertas más pequeñas, como las dos de 4.5×4.5 m del Gran Canal en L-0 o las de 6×2 m de la L-6 del TIRR. La alternativa descartada es gobernar la línea con una sola compuerta grande.

La obra complementaria para poner en operación el tramo 1 incluyó medias cañas del túnel en el paso de lumbreras, losas tapa, chimeneas o sistemas de ventilación, bardas y casetas de vigilancia, alimentación de energía y las compuertas de 5×5 m y 7×7 m en L-0 y de 7×7 m en L-5.

04

La descarga al río El Salto y su modelo físico

QUÉ SE DECIDIÓ Y POR QUÉ

En avenidas el TEO descarga $150 \text{ m}^3/\text{s}$ por un vertedor de descarga lateral hacia el río El Salto, cerca del portal de salida del Emisor Central. En estiaje, el gasto puede llegar a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y derivarse a la PTAR de Atotonilco. A solicitud de Conagua, el Instituto de Ingeniería de la UNAM construyó un modelo físico de la obra derivadora y lo probó con $170 \text{ m}^3/\text{s}$, $20 \text{ m}^3/\text{s}$ más que el gasto esperado. El estudio combina ese modelo con cálculo numérico: perfiles de flujo por el método directo por pasos y simulación del río con HEC-RAS.

La obra de derivación se compone de portal de salida, canal principal, desarenador, vertedor de excedencias, túnel alcantarilla bajo el río (el mismo del Emisor Central), encauzamiento del río y mejoramiento de zonas adyacentes.

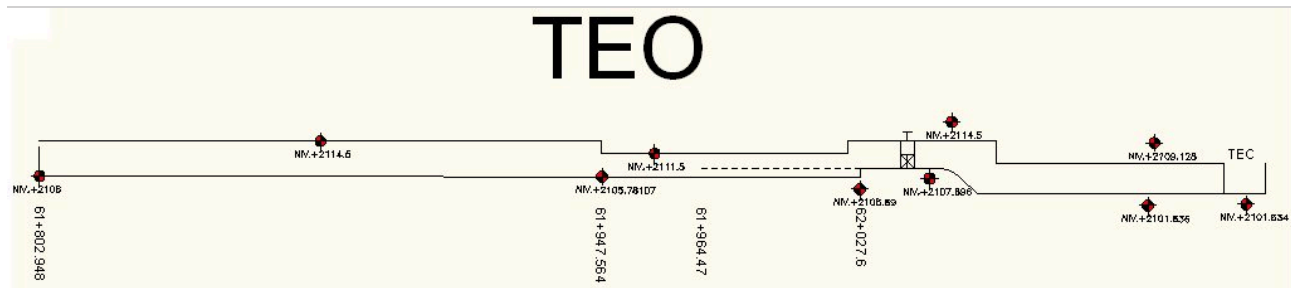


Figura 17.10. Canal principal del TEO en la primera versión de la obra de derivación

CÓMO SE VALIDÓ EL MODELO

Antes de proponer el arreglo del TEO se comparó el cálculo con las mediciones del modelo físico del Emisor Central, que servía de referencia. El perfil del agua en el canal principal del Emisor Central, calculado por incrementos finitos y medido con limnómetro electrónico, dio lo siguiente.

TABLA 17.6. PERFIL DEL CANAL PRINCIPAL DEL EMISOR CENTRAL, CALCULADO Y MEDIDO (MSNM)

PUNTO	CALCULADO	MEDIDO
Portal	2,108.06	2,106.80
Final de la transición (13.8 m del portal)	2,107.92	2,107.95
30 m antes del vertedor	2,107.826	2,107.85
Vertedor	2,107.79	2,107.81

La coincidencia es muy buena salvo en el portal, diferencia atribuida a la separación y aproximación de las secciones consideradas en la entrada. La curva gastos-elevaciones del vertedor del Emisor Central, con cresta en 2,106.13 y 50 m de longitud, midió 2,107.27 con 50 m³/s, 2,107.39 con 75 y 2,107.81 con 150. Con ese contraste el cálculo numérico quedó validado y se pasó a las dos versiones del TEO.

DOS VERSIONES COMPARADAS

La primera versión usa un vertedor Creager recto y la segunda uno curvo, como el del Emisor Central.

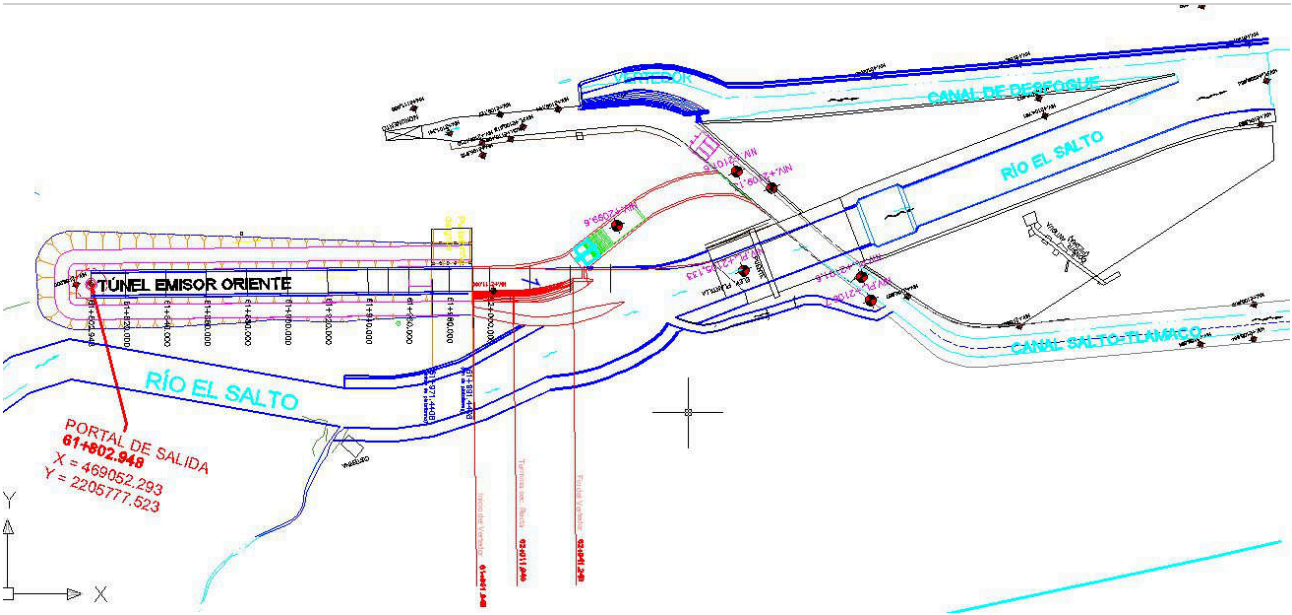


Figura 17.11. Planta de la segunda versión de la obra de derivación del TEO

TABLA 17.7. VERSIONES DE LA OBRA DE DERIVACIÓN PROBADAS EN EL MODELO FÍSICO

ELEMENTO	VERSIÓN 1	VERSIÓN 2
Portal de salida	cad. 61+802.948, plantilla 2,106 msnm	igual
Transición del túnel a canal rectangular	15 m; ancho de plantilla 12 m	15 m; ancho de plantilla 11 m
Pendiente del canal principal	0.0015139	no indicada
Vertedor	Creager recto, inicia en 61+947.56, plantilla 2,105.781, cresta 2,111.5 msnm, 60 m de cresta, tanque amortiguador de 15 m	Creager curvo, inicia en 61+991.948, cresta 2,111 msnm, 50 m de cresta, tanque amortiguador
Desarenador	cad. 62+027.6, plantilla 2,105.66; dos aberturas de 1.53 x 1.83 m para compuertas deslizantes	no indicado
Canal de unión TEO-Emisor Central	inicia en 2,107.66, rápida hasta 2,101.634 y luego horizontal	inicia en 2,107.28, rápida y tanque amortiguador
Compuertas de unión	radiales de 3 x 6 x 6 m, operadas eléctricamente	igual

ELEMENTO	VERSIÓN 1	VERSIÓN 2
Resultado en el modelo	el vertedor funciona bien; el canal de unión oscila con grandes ondas	el vertedor funciona bien, pero la descarga al río produce socavación intensa; el canal de unión mejora

El vertedor recto funciona mejor y es más sencillo de construir. El curvo reproduce el del Emisor Central, pero erosiona el río y su pared lateral, muy esbelta, requeriría apuntalamiento que invadiría el cauce. En cambio, para el canal de conexión la segunda versión es la mejor. La recomendación final combina ambas: canal de conexión de la versión 2 con el vertedor recto de la versión 1, alargando el tanque amortiguador después del cimacio, modificando el escalón del desarenador y ajustando la curva de conexión. El arreglo final debe probarse de nuevo en el modelo físico y que Conagua deberá considerar geotecnia, estructuras y procedimiento constructivo.



Figura 17.12. Detalle del vertedor de excedencias del TEO en el modelo físico

HIDRÁULICA DEL VERTEDOR Y DEL CANAL

El vertedor recto se dimensiona con la ecuación de descarga de un vertedor de pared gruesa:

$$Q = C L_e H^{3/2}$$

donde Q es el gasto en m^3/s , C el coeficiente de descarga en $\text{m}^{1/2}/\text{s}$, L_e la longitud efectiva de la cresta en m y H la carga sobre la cresta en m. Con $C = 1.7$, $L_e = 60$ m y $Q = 170$ m^3/s se despeja la carga:

$$H = \left(\frac{Q}{C L_e} \right)^{2/3} = \left(\frac{170}{1.7 \times 60} \right)^{2/3} = (1.667)^{2/3} = 1.406 \text{ m}$$

El tirante en el canal al inicio del vertedor es la carga más la altura de la cresta sobre la plantilla ($2,111.5 - 2,105.781 = 5.72$ m): 7.05 m en el estudio. La suma directa da $5.72 + 1.406 = 7.13$ m; la diferencia viene del redondeo de la plantilla (inferencia).

Con $n = 0.017$, ancho de plantilla $b = 12$ m y $S_0 = 0.0015139$, se calcula hacia aguas arriba, por el método directo por pasos, el perfil hasta el portal, a 144.6 m. La distancia entre dos secciones se obtiene de

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - \bar{S}_f}, \quad E = y + \frac{V^2}{2g}$$

donde Δx es la distancia entre secciones en m, E la energía específica en m, y el tirante en m, V la velocidad en m/s , g la gravedad en m/s^2 , S_0 la pendiente de la plantilla y $\bar{S}_f$ la pendiente de fricción media entre las dos secciones. El tirante en el portal resulta de 6.85 m, correspondiente a la cota 2,112.85 msnm. Como la clave del túnel está en 2,113 msnm, el túnel no se ahoga, pero queda a solo 0.15 m de la clave.

Para el río, la simulación HEC-RAS usó 23 secciones transversales, 430 m de tramo y rugosidades de 0.017 en la parte rectificadora y 0.030 en el resto, con control crítico en la rápida del tanque amortiguador. Con 80 m^3/s del río (dato de Conagua) y 170 m^3/s del TEO, 250 m^3/s en total, el tirante en el punto de unión fue de 3.35 m (nivel 2,110.14 msnm). La cresta (2,111.5) queda entonces 1.36 m por encima y el vertedor descarga libremente.

La curva gastos-elevaciones del vertedor de la versión 2, medida en el modelo, permite calcular el coeficiente de descarga:

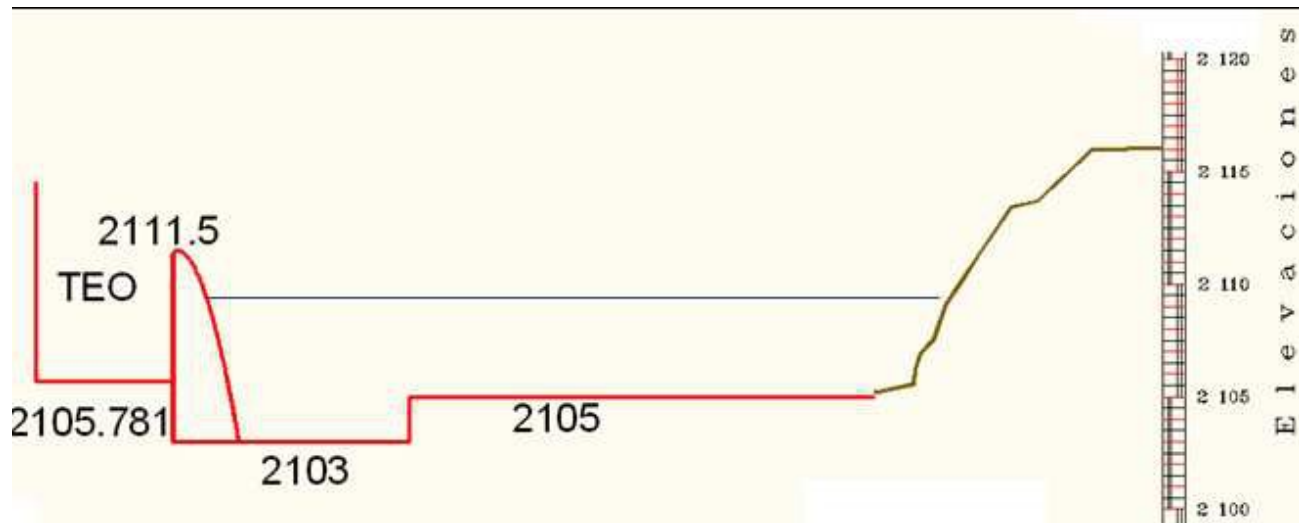


Figura 17.13. Perfil del vertedor, el tanque y el canal hacia el río El Salto

TABLA 17.8. CURVA GASTOS-ELEVACIONES DEL VERTEDOR DEL TEO (VERSIÓN 2) Y COEFICIENTE DE DESCARGA CALCULADO

Q (M ³ /S)	ELEVACIÓN DEL AGUA (MSNM)	CARGA H (M)	C CALCULADO (M ^{1/2} /S)
50	2,111.73	0.73	1.60
81	2,111.95	0.95	1.75
120	2,112.22	1.22	1.78
145	2,112.31	1.31	1.93

Para 145 m³/s, por ejemplo,

$$C = \frac{145}{50 \times (1.31)^{3/2}} = \frac{145}{50 \times 1.499} = 1.93$$

El coeficiente crece con la carga y rodea el 1.7 usado en el diseño, como se espera de un perfil Creager (inferencia).

Para validar el cálculo, el modelo físico midió el perfil del canal principal de la versión 2 con 170 m³/s: 6.53 m al fin de la transición (nivel 2,112.51), y 6.81 m, 6.88 m y 6.93 m en los tres puntos siguientes, con desviaciones estándar de 0.01 a 0.12 m. Dentro del tanque amortiguador, a los cadenamientos 62+000, 62+020 y 62+040, el tirante

promedio fue de 2.16, 3.01 y 3.26 m, con máximos de 2.46, 3.45 y 3.60 m y desviaciones de 0.14, 0.16 y 0.13 m. El cálculo y la medición coinciden, salvo en la transición de entrada, atribuida otra vez a la separación de las secciones consideradas.

SOCAVACIÓN EN LA DESCARGA

La versión curva produjo, tras una descarga de 170 m³/s, socavaciones de 8.1 m en el sitio 1 (de la cota 2,105.03 a 2,096.93), 8.7 m en el sitio 2, 3.6 m en el sitio 3 y 6.15 m en el sitio 4. Esos valores ponen en peligro la estructura de descarga y son la razón técnica principal del descarte. La mitigación sería revestir el río en esa zona, con un costo importante de obra.

05

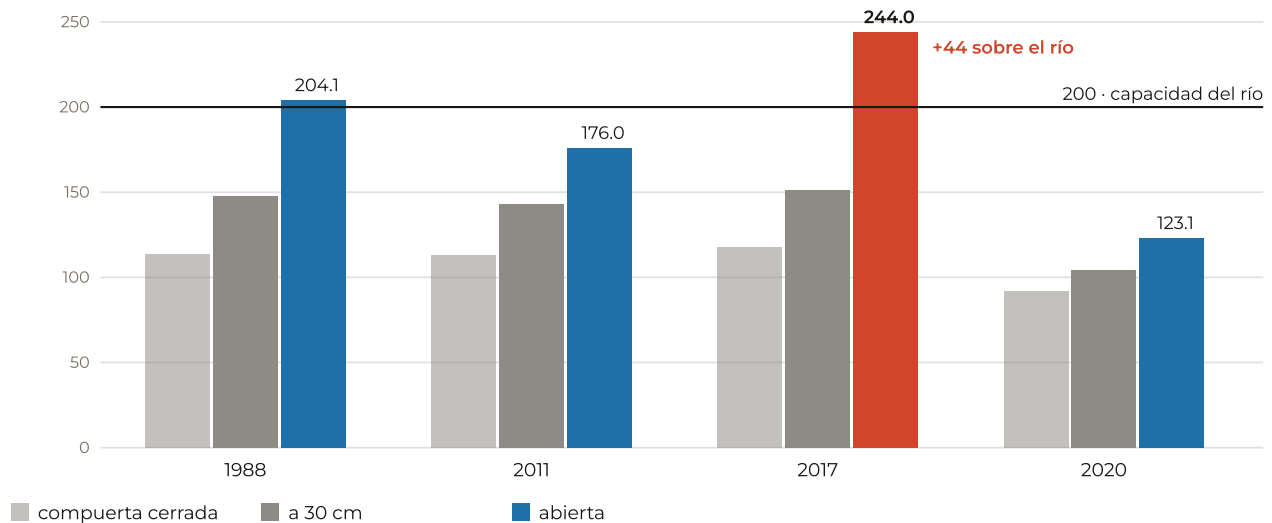
El límite aguas abajo y la operación en avenidas

EL RÍO TULA COMO LÍMITE

La recomendación es un gasto de 30 m³/s del TEO hacia el río y una capacidad total del río de 200 m³/s, suma del Emisor Central a 170 m³/s más el TEO. La tabla 17.9 resume la modelación de cuatro eventos con la compuerta de L-5 en tres posiciones.

TABLA 17.9. GASTO MÁXIMO INSTANTÁNEO DE SALIDA (M³/S) DEL TEO Y DEL TEO MÁS EL EMISOR CENTRAL, SEGÚN LA COMPUERTA DE L-5

	TEO, COMPUERTA A EVENTO 30 CM	TEO, COMPUERTA ABIERTA	TEO + TEC, CERRADA	TEO + TEC, A 30 CM	TEO + TEC, ABIERTA
1988	35.1	96.5	113.9	147.8	204.1
2011	33.3	68.9	113.0	143.1	176.0
2017	35.7	134.3	117.6	150.9	244.0
2020	15.4	32.0	91.9	104.5	123.1

TEO y Emisor Central juntos: gasto máximo de salidam³/s según la posición de la compuerta de L-5, en cuatro tormentas

Elaboración propia con datos de Vázquez Martínez (2021, pp. 144-145, tablas 8.2 a 8.4).

Figura 17.14. Gasto de salida de TEO más Emisor Central según la compuerta de L-5

Con la compuerta a 30 cm, el TEO descarga alrededor de 35 m³/s, apenas arriba de la recomendación de 30. Con la compuerta abierta, en el evento de 2017 llega a 134.3 m³/s, 79 % de los 170 m³/s que se toman como capacidad, y el conjunto TEO más Emisor Central rebasa en 44 m³/s la capacidad del río (244 contra 200 m³/s).

POLÍTICA DE OPERACIÓN

Durante la primera parte de una tormenta se busca desalojar los escurrimientos fuera del valle lo más rápido posible, para no ocupar el almacenamiento del sistema. Cuando el Emisor Central y el TEO llegan a su límite, en particular cuando el Emisor Central entra en carga, se reducen las aportaciones y se usan las lagunas de regulación Churubusco y Regulación Horaria. El protocolo indica cómo operar 26 estructuras estratégicas con datos de 29 estaciones de lluvia en tiempo real del Sacmex.

El límite de diseño merece comentario. Según el Manual de Hidráulica Urbana citado en la tesis, una obra debe manejar sin problemas todas las tormentas iguales o menores a la de diseño, y se acepta que el conducto trabaje lleno, pero sin entrar en carga. En la zona

metropolitana, por el terreno plano y los hundimientos, es prácticamente imposible diseñar sin que el drenaje entre en carga, y se prefiere como límite que no haya derrames a la superficie. El criterio operativo del sistema es "sin derrame" y no "sin carga".

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON EL TEO

La simulación de cuatro tormentas con el modelo SWMM del Instituto de Ingeniería, en 12 corridas (4 eventos por 3 condiciones de la compuerta de L-5), arroja estos resultados.

1. Con la compuerta de L-5 totalmente abierta, el TEO no entra en carga; con la compuerta cerrada o castigada entra en carga la mayoría de las veces, con tirantes variables en las lumbreras.
2. La L-0 del TEO tiene 23.3 m de profundidad; el Sacmex clasifica el tirante en L-0 como normal a 3 m, preventivo a 13 m y crítico a 15 m.
3. En 1988, 2011 y 2017 el nivel crítico de la laguna de regulación se superó (2,224.6 msnm), pero con el TEO abierto el máximo se alcanza unas 12 horas después y los niveles bajan; en 2020 la tormenta no comprometió el TEO.
4. Sin el TEO las lagunas trabajan a su máxima capacidad antes y durante más tiempo.

La razón de ser del TEO queda cuantificada por el registro del Emisor Central. Entre 1999 y 2019 entró en carga, medido en su L-0 con nivel superior a 6.5 m, de 1 a 18 veces al año: 6 en 2002, 9 en 2005, 15 en 2006, 18 en 2014, 16 en 2017 y 12 en 2019. Sin una segunda línea, el Emisor Central trabaja en carga varias veces al año y ha provocado desbordamientos de lumbreras en zonas bajas.

LA PARADOJA OPERATIVA

El TEO alivia el sistema solo si opera con sus compuertas abiertas, pero hoy se mantienen castigadas para limitar el gasto que llega al río Tula. La obra puede transportar mucho más de lo que su cauce receptor admite. Por eso se recomienda, como acción urgente, ampliar la capacidad del río o crear otros cuerpos de agua a la salida del TEO.

Es el resultado más relevante de la parte hidráulica. El túnel está bien dimensionado, con una holgura de 20 % o más según el cálculo, y aun así su aprovechamiento depende de una obra que no forma parte de él: la capacidad de un cauce receptor suele quedar fuera

del alcance del contrato de la obra principal. Una obra de 150 m³/s requiere verificar desde el proyecto que el cauce receptor la resista, y las compuertas castigadas indican que esa verificación no se completó.

06

Cortes y perfiles de la descarga

Las estructuras de la descarga se muestran en los siguientes cortes y perfiles.

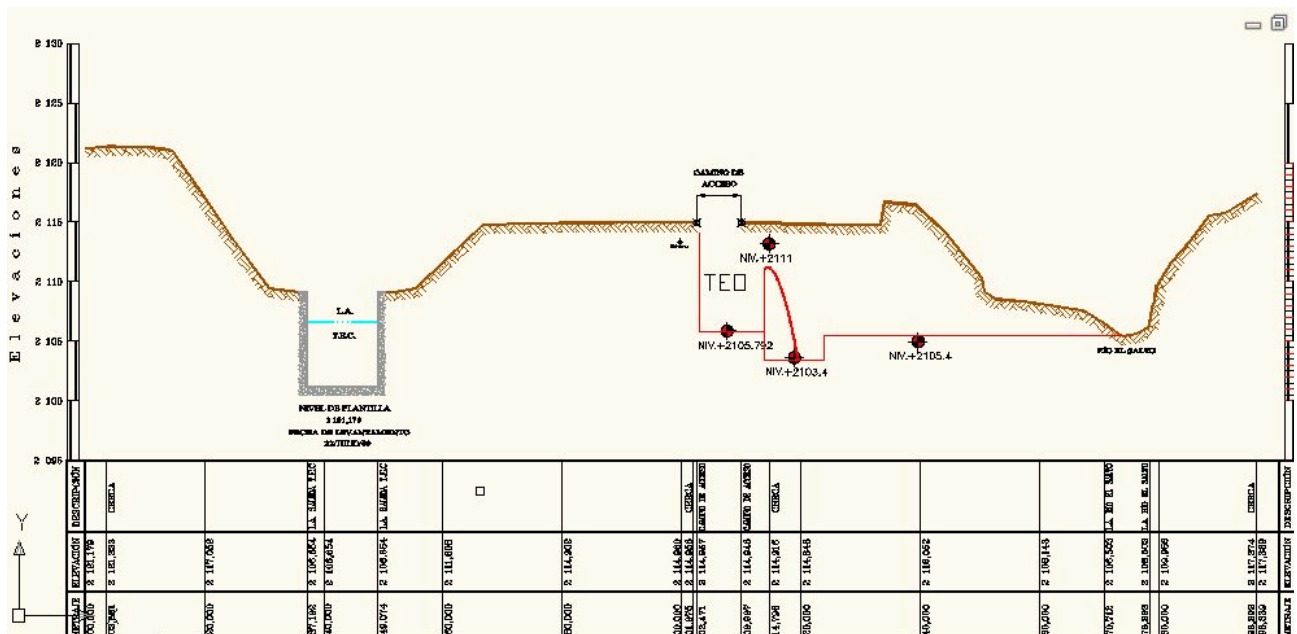


Figura 17.15. Corte del portal de salida y el canal con el terreno

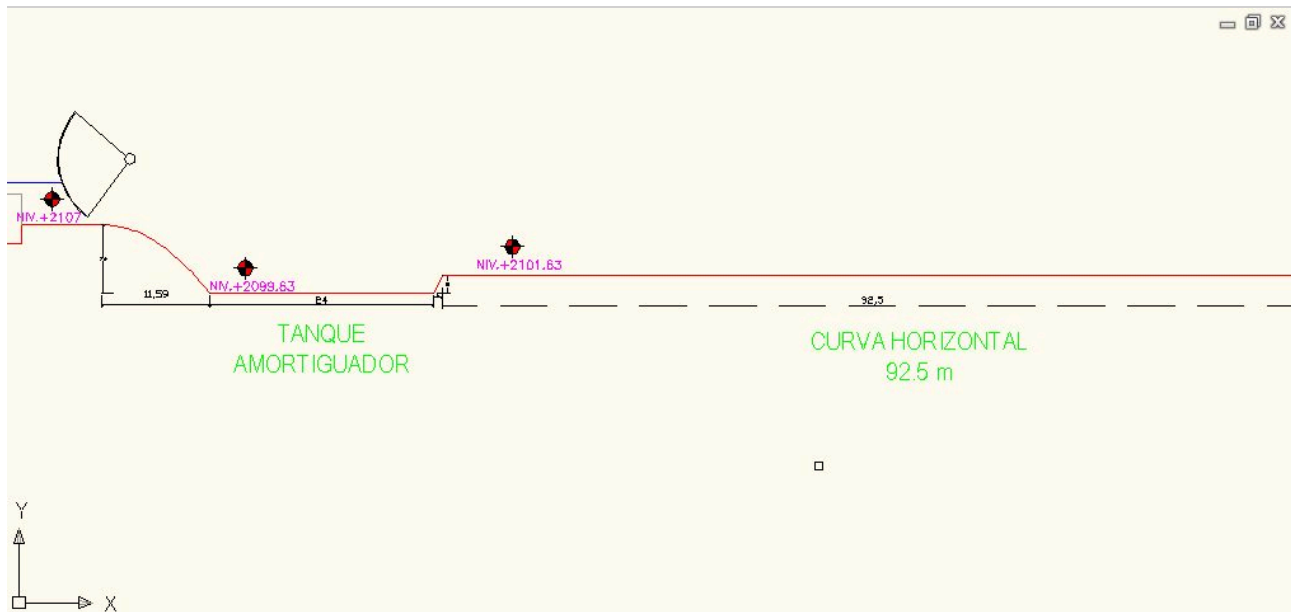


Figura 17.16. Perfil de la conexión con el acceso a las alcantarillas

07

Eficiencia del tipo de obra

Esta sección evalúa si un túnel profundo por gravedad fue el tipo de obra adecuado para ampliar el desalojo del Valle de México. Se juzga el tipo de obra (túnel, canal o bombeo) y no el proceso constructivo, que se trata en los capítulos 14 y 15. Los criterios generales de selección están en el capítulo 2; aquí se usan cinco que surgen de los problemas del sistema: capacidad sostenida, sensibilidad a los hundimientos, dependencia de energía, facilidad de operación y mantenimiento, e impacto superficial.

EL CANAL A CIELO ABIERTO

El Gran Canal del Desagüe, iniciado en 1856, se amplió hasta una capacidad de 90 m³/s. Por ser superficial sufre de lleno los hundimientos: el bombeo de acuíferos consolida la arcilla y hace que la obra trabaje a contrapendiente, lo que redujo su capacidad y fue la causa principal de las grandes inundaciones.

Los números lo muestran. En 1975, con 10 millones de habitantes, el Emisor Poniente, el Emisor Central y el Gran Canal desalojaban 30, 170 y 80 m³/s (suma 280); en 2007, con cerca de 20 millones, 30, 110 y 25 m³/s (suma 165), una pérdida de 115 m³/s. En 2017 el tramo del Gran Canal que recibe al Dren General del Valle solo conducía hasta 50 m³/s. El canal perdió casi 70 % de su capacidad, de 80 a 25 m³/s en esa comparación, un deterioro que un conducto profundo no sufre por hundimiento.

EL BOMBEO

Cuando el desnivel natural ya no alcanza, se bombea. El propio drenaje lo hizo: se intercalaron plantas entre alcantarillas y colectores, y desde 2007 se construyeron cuatro plantas para cerrar la toma del Gran Canal y dar mantenimiento al Emisor Central: Gran Canal km 11+600 (21 m³/s), Casa Colorada Superficial (20 m³/s), Canal de Sales (10 m³/s) y Vaso del Cristo (9 m³/s). Las plantas convencionales sufren asentamientos diferenciales en suelo lacustre, lo que dificulta su operación y eleva el costo de construcción.

La energía lo decide. Con la misma ecuación de potencia de la sección 12.2, elevar los 150 m³/s del TEO a los 48.72 m de la L-5 exigiría

$$P = \frac{1000 \times 9.81 \times 150 \times 48.72}{0.75} = 95.6 \times 10^6 \text{ W} \approx 96 \text{ MW}$$

y cada metro cúbico elevado costaría

$$E = \frac{\rho g H}{\eta \times 3.6 \times 10^6} = \frac{1000 \times 9.81 \times 48.72}{0.75 \times 3.6 \times 10^6} = 0.18 \text{ kWh/m}^3$$

donde E es la energía por metro cúbico en kWh/m³ y 3.6×10^6 convierte joules a kWh (cálculo propio). Además el bombeo funciona solo mientras haya electricidad, lo que vuelve al sistema "excesivamente complicado, sujeto a cortes de energía eléctrica y poco confiable".

EL TÚNEL PROFUNDO POR GRAVEDAD

El Plan General del Departamento del Distrito Federal de 1954 propuso una solución "que no fuera afectada por los hundimientos diferenciales del subsuelo y que trabajara por la acción de la gravedad". En la planeación original se descartó una alternativa:

concurrir los interceptores en Cuauhtepac, descargar a un cárcamo y bombear por un túnel a un punto del Gran Canal en Ecatepec. En 1959, con más datos y experiencia en túneles en arcilla y roca, se pudo proponer la gravedad y evitar la planta de bombeo.

El TEO repite la decisión con un matiz propio: acepta que habrá hundimientos y le da al primer tramo una pendiente inicial mayor para absorberlos (sección 10.3).

TABLA 17.10. COMPARACIÓN DE LOS TRES TIPOS DE OBRA

CRITERIO	CANAL SUPERFICIAL (GRAN CANAL)	BOMBEO	TÚNEL PROFUNDO POR GRAVEDAD
Capacidad sostenida	Perdió de 80 a 25 m ³ /s entre 1975 y 2007	Depende de la energía y del equipo instalado	El Emisor Central pasó de 170 a unos 110 m ³ /s por rugosidad y falta de mantenimiento, no por pendiente
Sensibilidad a hundimientos	Alta: trabaja a contrapendiente	Media: las plantas se asientan; las bombas compensan carga	Baja: está bajo la capa compresible; el TEO añade pendiente de reserva
Dependencia de energía	Nula, salvo plantas auxiliares	Total	Nula
Operación y mantenimiento	Fácil de ver; muy expuesto	Exige operadores y repuestos	Difícil: inspección en túnel con gases; requiere cerrar captaciones
Impacto superficial	Alto: ocupa un corredor urbano	Medio: cárcamos y casas de máquinas	Bajo: solo lumbreras y portales

EFICIENCIA DE LA SECCIÓN

Para comparar la eficiencia hidráulica de los emisores se calcula el gasto de proyecto por unidad de área de sección:

$$\frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi D^2/4}, \quad \text{TEO: } \frac{150}{38.5} = 3.9 \text{ m/s}$$

donde Q/A tiene unidades de velocidad (m/s), Q está en m³/s y D en m.

TABLA 17.11. GASTO DE PROYECTO POR UNIDAD DE ÁREA DE SECCIÓN CIRCULAR

TÚNEL	DIÁMETRO (M)	ÁREA (M ²)	Q DE PROYECTO (M ³ /S)	Q/A (M/S)
Emisor Central	6.5	33.2	220	6.6

TÚNEL	DIÁMETRO (M)	ÁREA (M ²)	Q DE PROYECTO (M ³ /S)	Q/A (M/S)
Interceptor Central	5.0	19.6	90	4.6
Emisor Poniente II	7.2	40.7	112	2.8
TEO	7.0	38.5	150	3.9

El Emisor Central se diseñó con una velocidad de proyecto alta, compatible con su pendiente de 0.00195, y sufrió abrasión de la cubeta con erosión de hasta unos 30 cm en algunos tramos. El TEO eligió un diámetro mayor y una velocidad menor, que reduce el desgaste (inferencia), a cambio de excavar 38.5 m² para dar 150 m³/s frente a los 33.2 m² del Emisor Central para 220 m³/s.

Los montos de contrato y el costo por kilómetro se tratan en el capítulo 20.

TABLA 17.12. COMPARACIÓN DEL TEO CON EL EMISOR CENTRAL Y LOS EMISORES DEL PONIENTE

CONCEPTO	EMISOR CENTRAL	EMISOR PONIENTE I	EMISOR PONIENTE II	TEO
Año de obra	1967-1975	1962	iniciado en 2013; primera etapa concluida en octubre de 2018	aprobado en 2007; inaugurado el 23 de diciembre de 2019
Longitud	50 km	12.4 km	9.8 km	62.4 km
Sección	circular, 6.5 m	herradura; 4.5, 5.2 y 6.35 m	circular, 7.2 m	circular, 7.0 m
Capacidad de proyecto	200-220 m ³ /s	30, 45 y 80 m ³ /s según el tramo	112 m ³ /s	150 m ³ /s
Capacidad actual citada	unos 120 m ³ /s	afectado por fractura de 30 m en 2009	en obra	150 m ³ /s de proyecto; operación limitada por compuertas castigadas
Pendiente	0.00195	no se indica	no se indica	1.9 a 1.5 m/km (L-0 a L-6) y 1.6 m/km después
Función	desalojo central	interceptar poniente	aliviar y permitir mantener el Emisor Poniente I	segunda salida del sistema profundo

El Emisor Poniente I tiene una estructura de herradura con juntas machihembradas sin acero de refuerzo, y su fractura de 30 m en 2009 durante una tormenta muestra el riesgo de sobrepresión cuando un conducto antiguo entra en carga. El Emisor Poniente II (7.2 m, dovelas con acero de refuerzo y revestimiento definitivo de 25 cm) y el TEO comparten el principio de doble revestimiento contra fugas, corrosión y gases.

LÍMITES DE LA EFICIENCIA

Se identifican cuatro límites.

1. El cauce receptor: la capacidad del río Tula limita lo que el TEO descarga con sus compuertas abiertas, de modo que una obra de 150 m³/s funciona hoy a una fracción de su capacidad en avenidas.
2. La subsidencia: los hundimientos seguirán afectando al sistema y será inminente incorporar nuevas obras. La reserva de pendiente del TEO no es infinita.
3. La rugosidad y la abrasión: el margen de capacidad depende del estado del revestimiento (tabla 17.3).
4. La regulación aguas arriba: muchos escurrimientos problemáticos nacen fuera de la zona urbana; se recomienda regularlos antes de que entren al sistema, rehabilitar las lagunas Ciénega Chica y Grande y construir las lagunas de regulación 3 y 4 en el oriente.

La valoración del tipo de obra es favorable. De las tres alternativas, el túnel por gravedad es la que resuelve los dos problemas estructurales del Valle, la pérdida de pendiente por hundimientos y la dependencia de energía, y los datos que lo sustentan son la caída del Gran Canal de 80 a 25 m³/s y la fragilidad de las plantas en suelo lacustre. Lo que el tipo de obra no resuelve solo es el mantenimiento ni el río receptor.

08

Operación y mantenimiento

Las fuentes documentan con detalle el mantenimiento de los túneles de 1975, el Emisor Central y los interceptores Central y Oriente. Lo que sigue aplica esa experiencia al TEO, y lo que se dice de él es inferencia.

LA FALLA DE ORIGEN: UN TÚNEL QUE NO SE PODÍA APAGAR

El drenaje profundo se diseñó para operar solo en lluvias y quedar seco en estiaje para ser inspeccionado y reparado. La pérdida de capacidad de los drenes superficiales obligó a usarlo también en estiaje. Desde los años ochenta, para no suspender las inspecciones, se intentó recorrer el Emisor Central con equipo anfibio y varias veces la lancha volcó; después se usó un tractor agrícola que remolcaba plataformas sobre llantas. Cuando el drenaje se convirtió en sanitario permanente, las inspecciones dejaron de poder hacerse. En 1999 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México detectó que el Emisor Central ya no trabajaba a 220 m³/s y que algunas lumbreras tomaban carga.

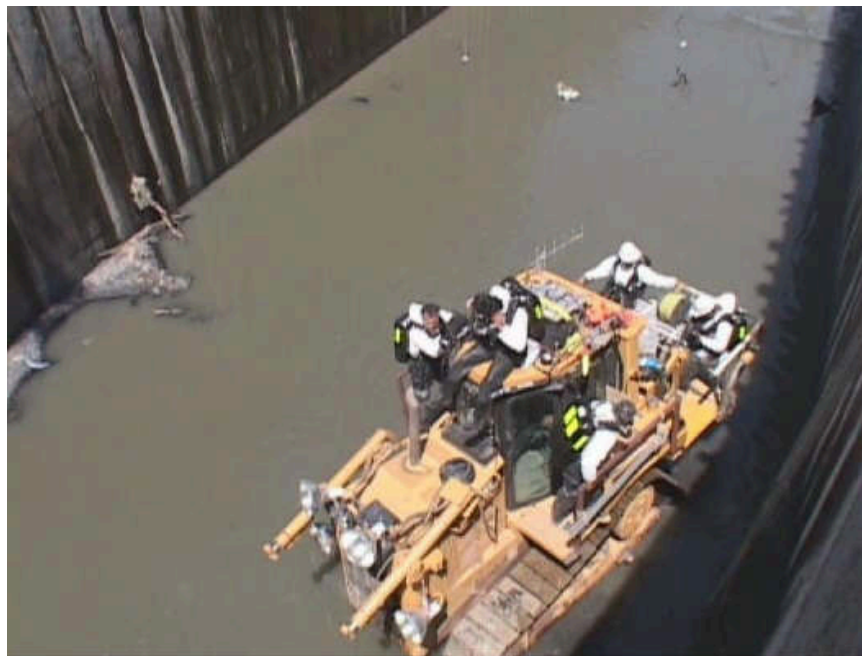


Figura 17.17. Inspección al Emisor Central con vehículo sobre plataforma de llantas

TABLA 17.13. INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EMISOR CENTRAL

PERIODO	ACCIÓN	RESULTADO
Años ochenta	Inspección con equipo anfibio por L-0 hasta el portal; luego con tractor y plataformas	Solo se detectaban filtraciones mayores
1999	El Sistema de Aguas informa que ya no se alcanzan los 220 m ³ /s	Se sospechan anomalías
2002	Planta de bombeo de 42 m ³ /s en el Gran Canal (Draga)	Libera capacidad
Estiaje 2004-2005	Vehículo anfibio no tripulado con cinco videocámaras (tramo L3-L4)	Deterioro del concreto en la clave con acero expuesto; sin daños estructurales graves en ese tramo
Estiaje 2005-2006	Inspección L9A-L10 y L17-portal	Filtraciones, acero expuesto, desgaste de cubeta
2007	Inicia la construcción de cuatro plantas (suma de 60 m ³ /s)	Permiten cerrar la toma del Gran Canal y secar el Emisor Central
Inicios de 2008	Inspección con personal técnico, tras cerrar aportaciones	Concreto dañado, acero expuesto, filtraciones en juntas y boquillas de inyección
Finales de 2008	Recorrido de 1,455 m con el jefe de gobierno	Hallazgo público de deterioro grave

DAÑOS Y SU CAUSA

Los daños obedecen a tres mecanismos. En la clave hay ataque químico: en estiaje el túnel opera a menos de la mitad de su capacidad, la clave queda descubierta y los gases de las aguas negras, sobre todo ácido sulfhídrico, atacan el concreto y el acero hasta hacerlos desaparecer en algunas secciones. En la cubeta hay abrasión: el arrastre de sólidos desgasta el piso hasta unos 30 cm. En los costados hay desgaste por material en suspensión y acero expuesto con corrosión. El concreto original tenía resistencias de proyecto de 220 a 320 kg/cm² y cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico contra sulfatos.



Figura 17.18. Deterioro en la clave del drenaje profundo e inspección en la cubeta

El efecto es hidráulico. El Instituto de Ingeniería estimó que el gasto de diseño de 172.778 m³/s correspondía a una rugosidad equivalente mínima de 0.0126. En la condición deteriorada, con n de 0.016 a 0.0221, el gasto máximo variaba de 136.644 a 98.707 m³/s, y la capacidad pudo bajar hasta unos 70 m³/s. Con las reparaciones se esperaba n entre 0.0155 y 0.0143 y un gasto de 140.831 a 153.066 m³/s, alrededor de 80 % de la capacidad original.

El cálculo inverso con Manning para el Emisor Central ($D = 6.5$ m, $S = 0.00195$, tubo lleno) despeja n del gasto:

$$n = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{Q} = \frac{33.18 \times (1.625)^{2/3} \times (0.00195)^{1/2}}{Q}$$

donde n está en s/m^{1/3} y Q en m³/s. Da $n = 0.0127$ para 160 m³/s, $n = 0.0101$ para 200 m³/s y $n = 0.0169$ para 120 m³/s (cálculo propio), del orden de los que cita la fuente.

Dato técnico: la capacidad de proyecto del Emisor Central es de 172.778 m³/s en el estudio del Instituto de Ingeniería con $n = 0.0126$, de 200 o 220 m³/s en otras tesis. La diferencia depende de la rugosidad adoptada: con $n = 0.010$ el cálculo da 202.5 m³/s (tabla 17.2) y con $n = 0.0126$, unos 160 m³/s a tubo lleno.

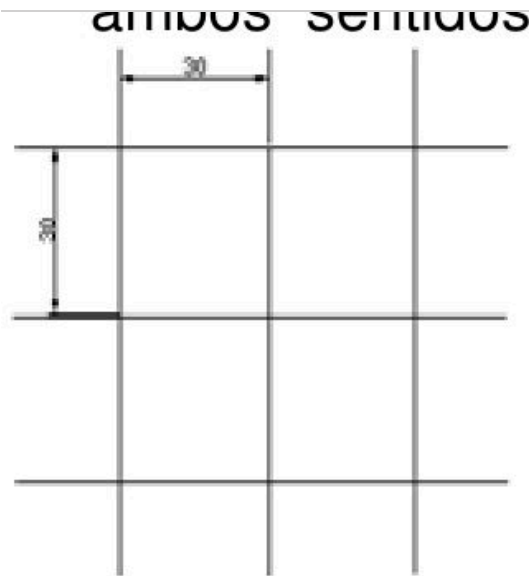
Los daños se clasifican en cinco tipos: desgaste del concreto, acero expuesto y rotura en las uniones túnel-lumbrera; oquedades, humedades y filtraciones; obstrucciones en la cubeta; daño en cubeta por abrasión; y obstrucciones por azolve donde el acero de la cubeta está expuesto, roto o doblado. A cada tipo se asignó un procedimiento: reparación de cubeta, protección de clave con polímeros, cimbra colapsable y recubrimiento de clave, y desazolve. Los trabajos se hacen en estiaje, cerrando captaciones, con protocolo de evacuación ante lluvias imprevistas.

LA REHABILITACIÓN DE L-8A A L-8B

El caso con más detalle es el del tramo L-8A a L-8B del Interceptor Oriente. Empezó entre el 5 y el 21 de noviembre de 2008, con el aislamiento hidráulico por cierre de compuertas en L-4B, 5A, 5B, 6A, 6B, 7 y 7A y agujas en L-8 y en la obra de toma. El estado encontrado era acero expuesto con corrosión total en los costados, clave sin acero por abrasión y corrosión, basura, un tirante de aguas negras de 50 a 65 cm, H_2S de 0 a 20 ppm y O_2 de 19 a 21 %.

La superficie se preparó con hidroescarificado a 28,000-30,000 psi, hasta pH 7, retirando unos 5 cm de concreto dañado. Se trataron 1,309 m en dos etapas: 240° y 120°, con rendimientos de 74.67 m² por turno. El armado fue acero No. 5 a cada 30 cm en ambos sentidos con anclas de 1/2" cada 1.20 m, $f_y = 4,200$ kg/cm². El revestimiento definitivo fue concreto autocompactable bombeable hecho en obra, $f'_c = 350$ kg/cm², resistente a sulfatos y abrasión: 1,299 m y 5,388.98 m³ entre el 27 de enero y el 1 de abril de 2009, con cimbra telescópica de módulos de 6 m con jumbo y concreto lanzado de $f'_c = 250$ kg/cm² en las uniones. La clave se protegió con lámina de PVC T-Lock importada; en los primeros colados se usó epóxico por la demora de su llegada.

El 6 de enero de 2009 el Sistema de Aguas dictaminó cambiar el procedimiento de concreto lanzado a cimbra telescópica y revestimiento a 360°. Se obtenía un revestimiento terso y completo, y la alternativa descartada deja una superficie más rugosa (inferencia a partir de la secuencia de trabajos).



ACERO DE REFUERZO.

Figura 17.19. Acero de refuerzo en el túnel rehabilitado del Interceptor Oriente

Rehabilitar tiene costo hidráulico. La rehabilitación del Interceptor Central (L-13 a L-0B) y del tramo L-8A a L-8B redujo el diámetro de 5.00 a 4.60 m. El tramo del Interceptor Central pasó de trabajar al 83.11 % de su capacidad a 98.31 %, porque un revestimiento menos rugoso aumenta la velocidad de 4.28 a 5.05 m/s; todo el interceptor recuperó 95 %, pero subieron los niveles en lumbreras aguas arriba. En el Interceptor Oriente, el tramo L-8A a L-8B perdió 5 % respecto de la capacidad original. De ahí la recomendación de no reducir el diámetro.

Para el TEO, recortar 40 cm de los 7.0 m bajaría el área

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{6.6}{7.0} \right)^2 = 0.889$$

y, a pendiente y rugosidad constantes, el gasto a tubo lleno, que varía con $D^{8/3}$,

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{6.6}{7.0} \right)^{8/3} = 0.855$$

donde el subíndice 1 es el diámetro original y el 2 el reducido. Es una baja de 11 % en área y de 15 % en capacidad (cálculo propio).



Figura 17.20. Cimbra telescópica y jumbo durante el revestimiento definitivo

QUÉ APLICA AL TEO

En lluvias el TEO funcionará junto con el drenaje profundo y, en secas, "alternadamente para facilitar su mantenimiento". Es la corrección de la falla principal de la historia previa. El TEO también tiene doble revestimiento, como el Emisor Poniente II, con dovelas cuya resistencia máxima de 350 kg/cm² se probó a la salida del curado de vapor y a 3, 7 y 28 días, y obras complementarias de operación como medias cañas, chimeneas de ventilación y alimentación eléctrica.

Con esa experiencia se plantea el plan de la tabla 17.14.

TABLA 17.14. PLAN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROPUESTO PARA EL TEO

ASPECTO	QUÉ HACER	RAZÓN
Inspección	Recorrido en estiaje con vehículo apto, como el Unimog, y cámaras; registro fotográfico por tramo	Las inspecciones del Emisor Central se suspendieron durante años
Gases	Monitoreo continuo de H ₂ S y O ₂ antes de entrar; ventilación forzada; equipo autónomo	H ₂ S de 0 a 20 ppm y O ₂ de 19 a 21 % en L-8A a L-8B
Clave	Proteger con lámina de PVC o recubrimiento polimérico desde el inicio	El ataque ácido en la clave es el principal daño

ASPECTO	QUÉ HACER	RAZÓN
Cubeta	Medir desgaste por perfilometría; reparar antes de que quede expuesto el acero	Erosión de 30 cm en algunos tramos
Rugosidad	Medir niveles y gastos para estimar n real cada temporada y compararlo con 0.013	Con $n = 0.016$ desaparece el margen de capacidad (tabla 17.3)
Compuertas	Operar totalmente abiertas o cerradas; mantenimiento anual de L-0, L-5 y del portal	Riesgo de vibración con apertura parcial
Captaciones	Revisión de cajas de control y desazolve antes de lluvias	La caja de control se ubica junto a la caja derivadora para evitar azolve
Rejillas y basura	Retención de basura gruesa en captaciones	La basura retenida por el acero expuesto casi taponó el Emisor Central
Estiaje	Mantener el TEO aislable y no usarlo permanentemente si hay otra opción	La operación permanente en estiaje impidió el mantenimiento
Subsidencia	Nivelación topográfica periódica de lumbreras y del perfil	Se requiere un levantamiento topográfico completo
Descarga	Monitoreo de socavación en el vertedor y el tanque amortiguador	Socavación de 8 m en el modelo físico con la versión curva

La experiencia enseña que el criterio de que el túnel casi no se usa en estiaje no sobrevive a la realidad. El TEO, que en estiaje puede conducir hasta $50 \text{ m}^3/\text{s}$ con posible derivación a la PTAR de Atotonilco, tiene un doble papel, sanitario y pluvial, y probablemente tendrá que operar de manera continua. Con $50 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.0016$ y $n = 0.013$, el tirante es de 2.6 m y la velocidad de 3.9 m/s (tabla 17.4), y conviene prever desde ahora qué compuertas cerrar y por dónde desviar el caudal para aislar un tramo.

Dato técnico: la comparación se basa en túneles de 1975 con revestimiento colado en sitio. El TEO tiene dovelas y revestimiento definitivo, de modo que la distribución de daños podría ser distinta.

Síntesis

Lo que se construye es lo que se contrata, y lo que se opera es lo que se hereda. Sobre esa base se desprenden las siguientes conclusiones del capítulo.

1. El túnel de 7.0 m y 62.4 km es suficiente para su gasto de proyecto. Con Manning, $n = 0.013$ y la pendiente más baja del trazo, cabe un máximo de unos $185 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. La pendiente decreciente, 1.9 m/km al inicio y 1.6 m/km después, es una decisión sensata frente a hundimientos de 8 a 12 cm al año.
3. Con $n = 0.016$ el margen sobre $150 \text{ m}^3/\text{s}$ desaparece. Lo ocurrido en el Emisor Central es la advertencia más costosa de todo el sistema, y por eso el plan de mantenimiento de la tabla 17.14 debe formar parte del proyecto y no ser un gasto posterior.
4. Las compuertas de L-0 y L-5 son el control real de la línea; conviene operarlas totalmente abiertas o cerradas y gobernar el gasto con compuertas menores.
5. El modelo físico del Instituto de Ingeniería es el mejor ejemplo de decisión técnica documentada del capítulo: dos versiones, medición, descarte del vertedor curvo por socavación de 8.7 m y recomendación de una combinación.
6. El límite de la obra está aguas abajo. Mientras el río Tula admita $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y el conjunto de los emisores pueda mandar 244, el TEO seguirá trabajando con compuertas castigadas.

En resumen: el TEO conduce por gravedad un gasto mayor al de proyecto y su pendiente decreciente absorbe los hundimientos. Su aprovechamiento real depende del estado del revestimiento y del río que recibe el agua, por lo que el mantenimiento y la verificación del cauce receptor forman parte de la decisión hidráulica. Frente al canal y al bombeo, el túnel por gravedad es el tipo de obra que resuelve los problemas estructurales del Valle.



Parte II · La línea de conducción del TEO

18

Sustentabilidad, autorización ambiental y normatividad

Por qué lo autorizó la Semarnat y con qué normas se construyó

Conagua ingresó la manifestación de impacto ambiental del TEO el 21 de mayo de 2008. La Semarnat la autorizó "de manera condicionada" el 1 de junio, con 16 términos y cinco condicionantes. Nadie pidió consulta pública. Este capítulo cuenta qué se autorizó, por qué, qué cambió en la obra después y qué normas la rodean.

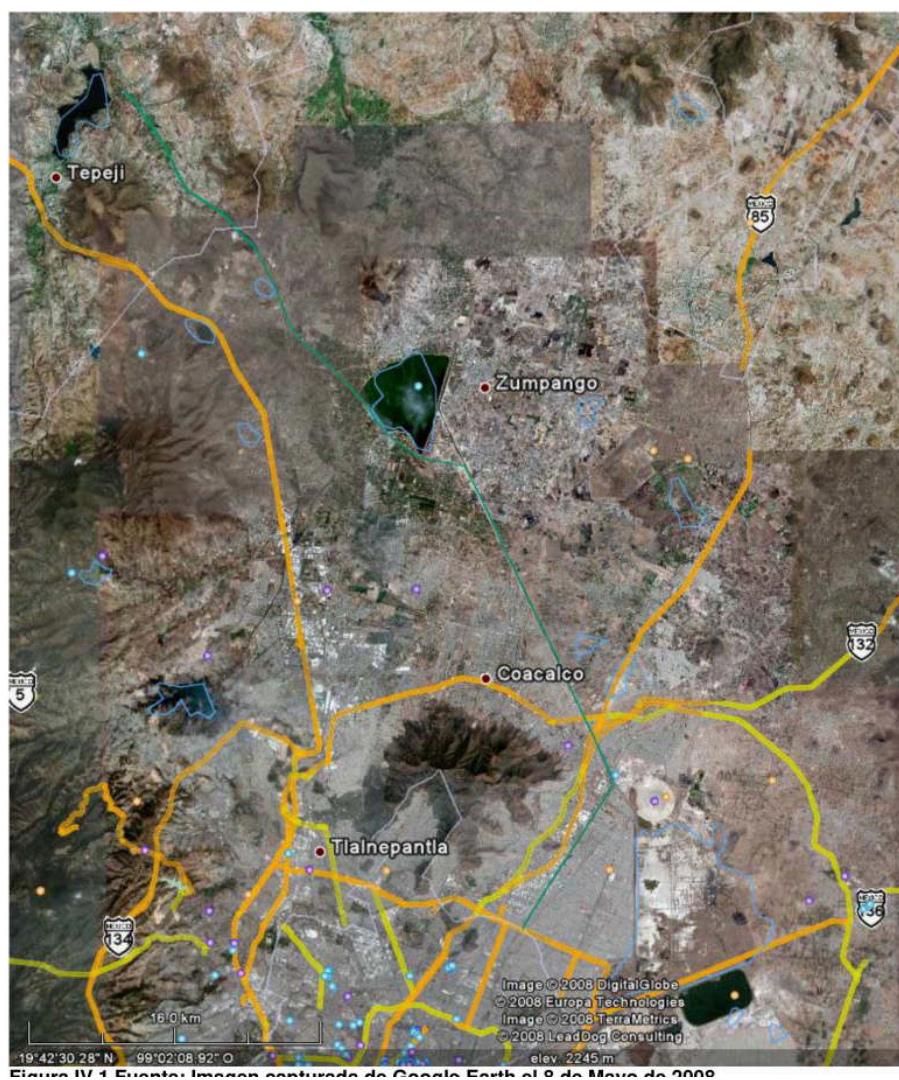


Figura 18.1. Trazo del TEO sobre imagen satelital, de Tlalnepantla y Coacalco a Zumpango y Tepeji

La pieza central es el resolutivo de impacto ambiental, clave DGIRA 15EM2008H0009. Las definiciones de sustentabilidad y sostenibilidad y el marco general de leyes y normas están en el capítulo 8; aquí se aplican al TEO.

01

Sustentabilidad del TEO

EL PRINCIPIO QUE INVOCA EL RESOLUTIVO

La LGEEPA no define "sostenibilidad", pero el resolutivo del TEO invoca los principios de política ambiental del artículo 15: los ecosistemas deben aprovecharse de manera que se asegure una productividad óptima y sostenida; quien afecte el ambiente debe prevenir, minimizar o reparar el daño y asumir su costo; y la responsabilidad ecológica incluye a las generaciones futuras. Es el marco con el que la autoridad evaluó la obra.

IMPACTOS Y MEDIDAS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Los elementos del medio se agrupan por etapa, cada uno con su indicador de impacto, con base en la MIA del proyecto. En operación los impactos se limitan a los residuos de las oficinas de las lumbreras, al empleo y al beneficio social de contar con el drenaje profundo.

TABLA 18.1. ELEMENTOS DEL MEDIO E IMPACTOS POR ETAPA DEL TEO

ELEMENTO DEL MEDIO	INDICADOR	EJEMPLO DE IMPACTO CITADO	ETAPA
Atmósfera	Calidad del aire por partículas y gases; ruido	Polvos del despalme; gases de vehículos; ruido de maquinaria	Preparación del sitio y construcción
Suelo	Topografía y erosión	Disposición inadecuada de residuos del despalme y del material de excavación	Preparación y construcción
Agua	Aguas residuales	Derrames de aceites y grasas que alcancen el subsuelo	Construcción
Flora y fauna	Vegetación y fauna existentes	Desplazamiento de fauna nociva por el despalme	Preparación
Paisaje	Apariencia visual	Alteración por lumbreras y bancos de tiro	Construcción
Residuos	Peligrosos y no peligrosos	Grasas, aceites, pinturas, envases impregnados; varilla, madera, alambre	Construcción

ELEMENTO DEL MEDIO	INDICADOR	EJEMPLO DE IMPACTO CITADO	ETAPA
Factores socioeconómicos	Bienestar social y empleo	Empleo local; beneficio social por la conducción de aguas residuales	Todas

TABLA 18.2. MEDIDAS AMBIENTALES APLICADAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y NORMA QUE LAS SUSTENTA

ASPECTO	MEDIDA DESCRITA	NORMA
Emisiones de vehículos	Programa de mantenimiento de maquinaria y verificación	NOM-041-SEMARNAT y NOM-045-SEMARNAT
Ruido	Vehículos recientes, mantenimiento de motores, protección personal	NOM-080-SEMARNAT-1994
Material de excavación	Camiones tipo rabón cubiertos con lona hacia bancos de tiro autorizados	Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
Aceites, grasas, combustibles y basura	Áreas con losa y pretil perimetral para evitar derrames al subsuelo	NOM-052-SEMARNAT-2005 y asociadas NOM-053 y NOM-054
Aire en el túnel	Sistema de ventilación para evitar concentración de gases	—
Suelos contaminados	Remediación en caso de derrame	NOM-EM-138-ECOL-2002 y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004
Transporte de residuos	Etiquetado de envases y embalajes	NOM-003-SCT/2000
Descargas de agua	Monitoreo en caso de que aplique	NOM-001-SEMARNAT-1996

Confinar residuos y combustibles sobre losas con pretil, en lugar de manejarlos sobre terreno natural, evita el derrame al subsuelo; la alternativa implícita, el manejo sin contención, se descarta por el riesgo de contaminar el suelo (inferencia). Varias de las normas citadas ya cambiaron; la sección 15.3 da el número y la vigencia actuales.

EL MATERIAL EXCAVADO

El material es el problema de sostenibilidad más tangible. El resolutivo estima un volumen total a disponer de 4,941,474.50 m³, entre túnel y lumbreras, y 82 posibles bancos de tiro, de los cuales 44 podían recibir casi 3,200,000 m³. La estimación de 2008

y los 4.7 millones de m³ excavados en la obra son del mismo orden: una es previsión y la otra, balance de obra. Los bancos usados en el TEO se describen en el capítulo 13.

La MIA-P explica cómo se eligieron los bancos potenciales, con cartas de INEGI, ortofotos procesadas en ArcGIS 9 y visitas de campo con GPS, y trae el mapa de bancos de tiro de la primera etapa, con claves BAT1 a BAT19 (Figura II.2, pp. 13-14). El resolutivo remite a las coordenadas UTM de los bancos en la Información Complementaria.

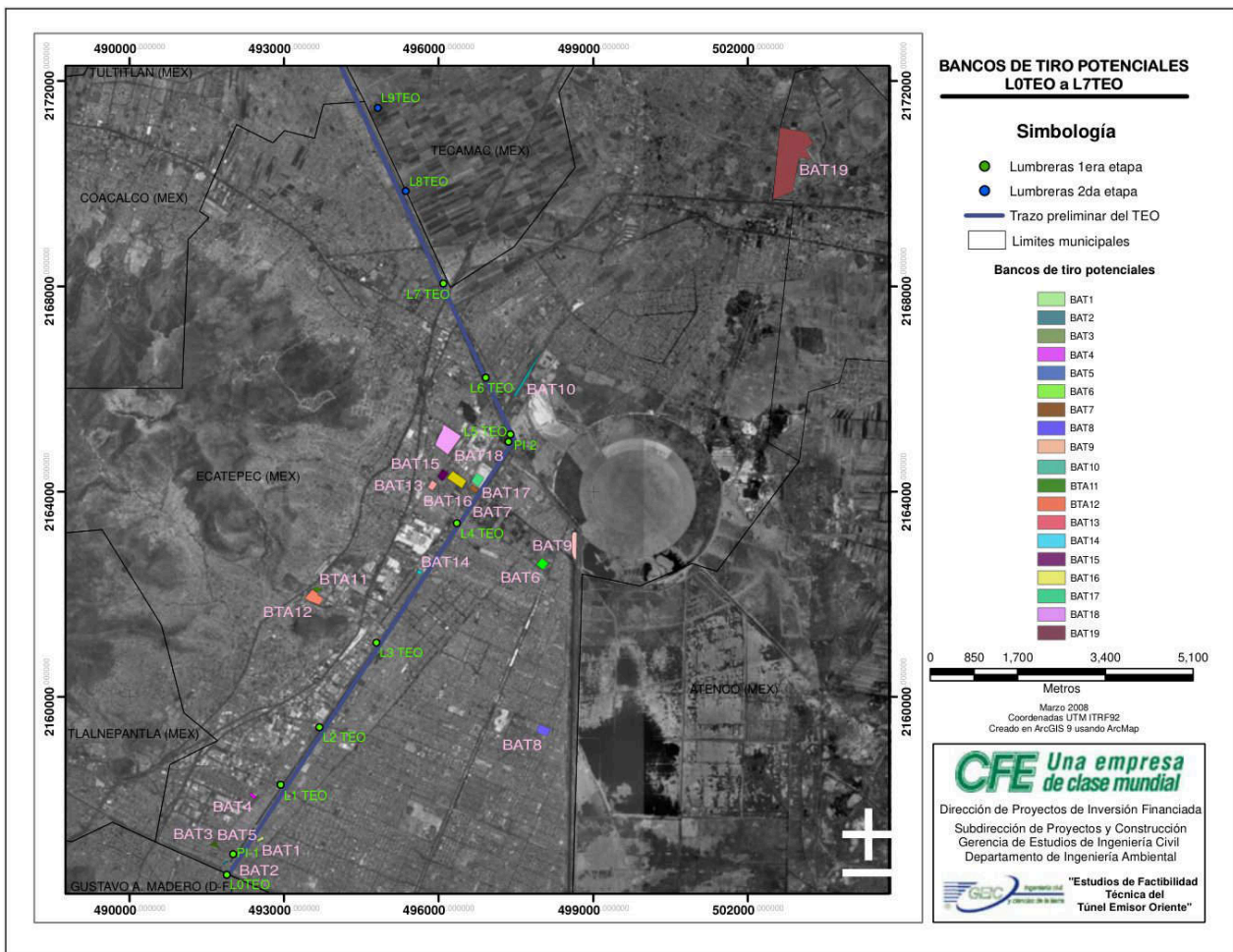


Figura II.2

Figura 18.2. Bancos de tiro potenciales L7TEO a L7TEO en el anteproyecto de 2008

DIMENSIÓN SOCIAL Y ECONÓMICA

El resolutivo reconoce que la operación del TEO vierte aguas de la Cuenca del Valle de México a la Cuenca del Río Tula, y que esa cuenca ya recibe descargas sin tratamiento, con riesgo de impactos acumulativos en la presa Endhó. Por eso exigió ampliar la capacidad de tratamiento (condicionante 2). El contexto social de ambas regiones está en el capítulo 21, y los montos y hallazgos de la ASF, en el capítulo 20. Un túnel por gravedad no requiere estaciones de bombeo para conducir el caudal, de modo que su costo energético de operación es bajo frente a una conducción bombeada (capítulo 17).

LA PTAR ATOTONILCO COMO PIEZA DE SUSTENTABILIDAD

La sustentabilidad del túnel no termina en el túnel: en el portal el agua puede tratarse en la planta de Atotonilco. La ficha oficial de la planta da 35 m³/s de capacidad media, cifra que se usa en este trabajo; las demás cifras publicadas (de 23 a 50 m³/s) y los datos de la obra se tratan en el capítulo 19.

El resolutivo de 2008 contaba cinco plantas, de las que los considerandos nombran seis ("El Salto", "Zumpango", "Nextlalpan", "El Cristo", "Guadalupe" y "Berriozábal"), para 40 m³/s en total, y exigió ampliar la de El Salto a un mínimo de 52 m³/s de descarga promedio anual. Atotonilco es la planta que cumple esa función: está en el sitio del portal de salida y es la única de ese tamaño en la zona (inferencia; el resolutivo no la nombra).

02

La autorización ambiental de la Semarnat

EL RESOLUTIVO Y SU FICHA

El resolutivo se conserva en el repositorio de la DGIRA (<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/mex/resolutivos/2008/15EM2008H0009.pdf>). Es un PDF escaneado de 32 páginas, con los datos personales testados con la leyenda "Datos protegidos LFTAIPG", y cierra con la referencia "15EM2008H0009 SINAT: Consecutivo: 15EM2008H0009-9 / Resolutivo procedente condicionado".

TABLA 18.3. FICHA DEL TRÁMITE

DATO	VALOR
Autoridad	Semarnat, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA)
Oficio	S.G.P.A./DGIRA.DG.1908.08, del 18 de junio de 2008
Promovente	Comisión Nacional del Agua; dirigido al Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento
Proyecto	"Proyecto para la construcción del Túnel Emisor Oriente, para incrementar la capacidad de desalojo de las aguas residuales y pluviales del Valle de México, y disminuir los riesgos de inundación a la población asentada en la zona"
Modalidad	Manifestación de impacto ambiental, modalidad particular (MIA-P)
Ingreso	21 de mayo de 2008, oficio B00.03.-169 de Conagua
Resumen ejecutivo	Solicitado por la DGIRA el 21 de mayo (cinco días hábiles) y entregado el 22 de mayo
Publicación	Separata DGIRA/023/08 de la Gaceta Ecológica, 22 de mayo de 2008
Consulta pública	Plazo hasta el 4 de junio de 2008; no se recibieron solicitudes
Información complementaria	Presentada por Conagua el 4 de junio de 2008 (oficio B00.03.-0198)
Resolución	Autorizado de manera condicionada (términos primero a decimosexto y cinco condicionantes)
Entidades	Gustavo A. Madero (D.F.); Coacalco, Ecatepec, Huehuetoca, Tultepec, Tultitlán y Zumpango (Estado de México); Tepeji del Río de Ocampo y Tula de Allende (Hidalgo)

Del ingreso, el 21 de mayo, a la resolución, el 18 de junio, pasaron 28 días naturales (cálculo propio). Para una obra de 62 km es un trámite muy rápido, y que no hubiera una sola solicitud de consulta pública pesa en la valoración de la sección 14.5.

POR QUÉ FUE COMPETENCIA FEDERAL

La DGIRA se declaró competente por los artículos 4, 5 (fracciones II, X y XX), 28 (primer párrafo y fracción XIII) y 35 de la LGEEPA, y por los artículos 2, 3, 4, 9, 12, 37, 38 y 44 del Reglamento en materia de evaluación del impacto ambiental (REIA), entre otros. Su razonamiento tiene tres pasos:

1. El proyecto abarca el Distrito Federal y dos estados, México e Hidalgo. Eso lo coloca en el artículo 5, fracción XX, de la LGEEPA: son facultades de la Federación los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas.
2. Durante la operación el túnel descargaría aguas pluviales y residuales de la Cuenca del Valle de México a la Cuenca del Río Tula, donde ya hay descargas a la presa Endhó.
3. Con ello cae en el artículo 28, fracción XIII, de la LGEEPA, y en el "artículo 5, inciso R)" del REIA, como se lee en la página 4 del oficio.

El inciso R) del artículo 5 del REIA trata de obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar. Un túnel de drenaje no entra literalmente en esa lista; la DGIRA parece haberlo aplicado por los cruces del trazo con ríos y canales y por la descarga final a un cauce, aunque el oficio no lo explica.

Se sometió a MIA federal, y no a evaluación estatal o municipal, porque el proyecto cruza tres entidades y descarga a otra cuenca. Las obras hidráulicas aparecen también en la fracción I del artículo 28 de la LGEEPA; el resolutivo no la cita, aunque explica por qué una obra así requiere autorización.

Dato técnico: preceptos de la resolución: Constitución, artículo 8; LGEEPA, artículos 4, 5 (II, IX, X y XX), 28 (XIII), 35 (fracción II) y 176; REIA, artículos 2, 3, 4, 9, 10, 11, 12, 17, 21, 37, 38, 39, 44 a 49; Reglamento Interior de la Semarnat; Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; Ley Federal de Procedimiento Administrativo, artículos 2, 13, 16 y 57.

QUÉ SE AUTORIZÓ EN 2008

El proyecto autorizado era un anteproyecto: un túnel de unos 62 km en cinco etapas, 7 m de diámetro, 180 m³/s y 24 lumbreras. El eje corría junto al Gran Canal los primeros 10 km, bajo él y paralelo hasta el km 38+500, y luego al noroeste, al sur de la laguna de Zumpango, hasta El Salto.

TABLA 18.4. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO SEGÚN LA MIA-P Y EL RESOLUTIVO

PARÁMETRO	VALOR EN EL RESOLUTIVO (2008)
Longitud	Aproximadamente 62 km (suma de etapas: 61,627 m)

PARÁMETRO	VALOR EN EL RESOLUTIVO (2008)
Diámetro del túnel	7 m
Capacidad máxima	180 m ³ /s
Lumbreras	24 (18 de 12 m y 6 de 18 m)
Profundidad	De 40 a 180 m
Etapas	Cinco: 13,417 m (7 lumbreras); 14,122 m (5); 10,694 m (4); 10,777 m (4); 12,617 m (4)
Excavación	Máquina tuneladora con revestimiento primario de dovelas (seis por anillo; anillo de 1 m de ancho)
Métodos para lumbreras	Flotación, muro Milán o anillos
Material a disponer	4,941,474.50 m ³ (túnel y lumbreras)
Bancos de tiro	82 posibles; 44 con capacidad de casi 3,200,000 m ³
Concreto	Aprox. 835,200 m ³ (f'c de 150 a 350 kg/cm ²)
Otros insumos	500,000 m ³ de arena; 460,000 m ³ de grava; 25,000 m ³ de lodo bentonítico; 100,000 m ³ de agua
Bancos de materiales	No requeridos por Conagua: los materiales los compran los contratistas
Portal de salida	A 150 m del portal de salida del Túnel Emisor Central, en Tula de Allende

TABLA 18.5. PROYECTO DE 2008 FRENTE A DATOS VERIFICADOS DE LA OBRA

CONCEPTO	RESOLUTIVO 2008	DATO VERIFICADO	OBSERVACIÓN
Caudal	180 m ³ /s	150 m ³ /s	El resolutivo da un máximo de la MIA
Lumbreras	24 (18 de 12 m y 6 de 18 m)	25 (15 de 12 m, 9 de 16 m, 1 de 18 m)	Cambió el número y la distribución de diámetros
Profundidad	40 a 180 m	25 a 150 m	Cambió
Longitud	~62 km (61,627 m)	62.4 km	Coherente
Diámetro	7 m	7.0 m	Coherente
Ancho de anillo	1 m	1.5 m	Cambió
Concreto	unos 835,200 m ³	1.3 millones de m ³	56 % mayor (1.3 / 0.8352)

CONCEPTO	RESOLUTIVO 2008	DATO VERIFICADO	OBSERVACIÓN
Material excavado	4,941,474.50 m ³ (estimado)	4.7 millones de m ³	Previsión frente a balance de obra

La diferencia importa legalmente. El término séptimo exige solicitar autorización a la DGIRA ante cualquier modificación al proyecto. Si 24 lumbreras pasaron a 25 y cambiaron los diámetros, debió existir un trámite de modificación.

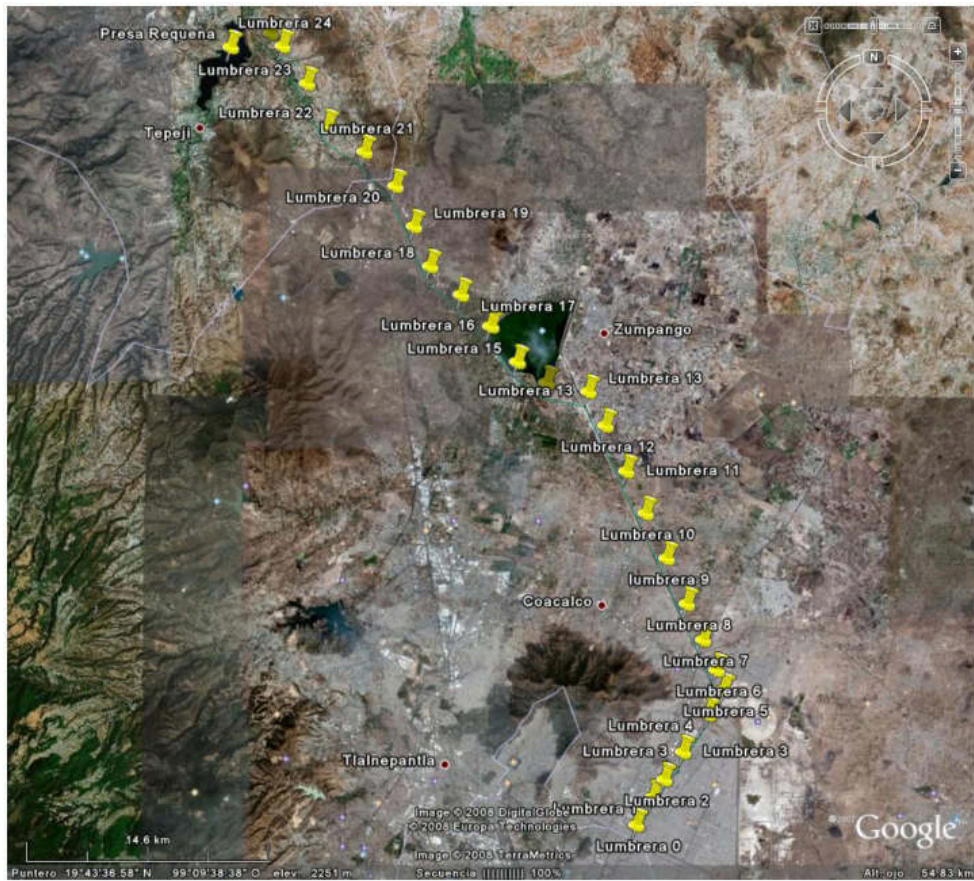


Figura 18.3. Trazo del anteproyecto de 2008 con 24 lumbreras



Figura 18.4. Trazo y lumbreras de la obra final del TEO

LOS TÉRMINOS Y LAS CONDICIONANTES

TABLA 18.6. TÉRMINOS DEL RESOLUTIVO

TÉRMINO	CONTENIDO	EFFECTO PRÁCTICO
Primero	Define el proyecto autorizado y sus características	Alcance de la autorización
Segundo	Vigencia de 4 años para preparación del sitio y construcción y 25 años para operación y mantenimiento; renovable con informe bajo protesta de decir verdad o constancia de Profepa	La excavación terminó el 23 de mayo de 2019, más de 10 años después del oficio, y la obra se inauguró el 23 de diciembre de 2019
Tercero	Cubre solo aspectos ambientales; no sustituye permisos locales (art. 35 último párrafo LGEEPA y 49 REIA)	Otros permisos corren por separado
Cuarto	Solo materia ambiental, según art. 28 fracción XIII	
Quinto	No autoriza actividades no listadas; cualquier otra debe avisarse a la DGIRA	
Sexto	Obligación del art. 50 del REIA si Conagua desiste de la obra	

TÉRMINO	CONTENIDO	EFFECTO PRÁCTICO
Séptimo	Cualquier modificación requiere autorización previa (arts. 6 y 28 REIA)	Ver tabla 18.5
Octavo	Las actividades se sujetan a la MIA-P y sus planos; establece las condicionantes	
Noveno	Informes de cumplimiento semestrales durante la construcción (el primero, un mes después del inicio de la preparación del sitio) y anuales durante ocho años tras terminarla; copia a las delegaciones de Profepa en la zona metropolitana, Estado de México e Hidalgo	Documentos que se pueden pedir por transparencia
Décimo	Avisar a la DGIRA y a Profepa el inicio y el fin de obra, dentro de 15 días	
Decimoprimer	La autorización es personal; el cambio de titular exige aviso y acuerdo de voluntades	
Decimosegundo	Conagua responde por sí y por terceros de impactos no considerados; Semarnat puede suspender obras y aplicar medidas del art. 170 de la LGEEPA	Base de la responsabilidad ambiental de contratistas
Decimotercero	Profepa vigila el cumplimiento (arts. 55, 59 y 61 del REIA)	
Decimocuarto	Conservar copia del expediente, MIA, información complementaria y resolución	
Decimoquinto	Recurso de revisión (art. 176 LGEEPA)	
Decimosexto	Notificación	

Las cinco condicionantes están en el término octavo, páginas 27 a 29. Se reproducen con su contenido completo.

1. Cumplir todas y cada una de las medidas de mitigación y compensación que la promovente propuso en la MIA-P, que la DGIRA considera viables y congruentes con la protección del ambiente, y acatar la LGEEPA, el REIA, las normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos aplicables, sin perjuicio de lo que establezcan otras instancias federales, estatales y locales, y las medidas que la DGIRA pide complementar en las propias condicionantes. Se apoya en los principios del artículo

15 de la LGEEPA y en el artículo 44, fracción III, del REIA, que permite considerar las medidas que la promovente proponga de manera voluntaria.

2. La MIA-P e Información Complementaria contemplan cinco plantas de tratamiento para 40 m³/s, pero la DGIRA dice que esa capacidad no es suficiente. Antes de que el proyecto entre en operación, Conagua debe proponer alternativas para ampliar la capacidad proyectada de las plantas, en específico la de El Salto, para tratar al menos la descarga promedio anual de agua residual manifestada, de 52 m³/s. La razón: el agua conducida va a la presa Endhó, ya muy contaminada.
3. Presentar a la DGIRA para su validación, en un plazo de tres meses posteriores a la recepción del oficio, un programa de protección de suelos para reducir los riesgos de erosión de la superficie afectada, elaborado y coordinado por personal capacitado. Debe contener: a) ubicación y extensión de las superficies sujetas a restauración del suelo; b) limpieza del sitio, descompactación o escarificación de los suelos, retirando los residuos de desmonte y despalme y restaurando los suelos que hubieran sido contaminados de manera accidental por aceites, grasas o combustibles; c) estabilización y protección de taludes contra deslizamientos, con inclinación que permita retener material terroso y revegetar, aprovechando el material acamellonado del despalme y reincorporando materia orgánica mediante la pica y dispersión del material vegetal de la remoción; d) indicadores de seguimiento para medir la eficiencia y eficacia de las medidas; e) calendarización de actividades.
4. Realizar acciones de reforestación o revegetación en las zonas aledañas a las lumbreras, con lo que cumple la política de restauración de la unidad ecológica Fo-2-164 del ordenamiento del Estado de México.
5. Queda prohibido reforestar o revegetar con especies exóticas o agresivas que puedan desplazar a las poblaciones vegetales nativas; se plantarán exclusivamente especies nativas acordes a la zona.

El resolutivo menciona cinco plantas en la condicionante 2 y seis en los considerandos. La autoridad también dio por viables medidas del promovente: humedecer con agua las áreas de movimiento de tierras, depositar los residuos domésticos en tambos rotulados, reforestar con especies nativas en lumbreras, prohibir la captura de flora y fauna con rescate de ser necesario, y enviar los residuos peligrosos a empresas autorizadas.

Las condicionantes se orientan a la superficie, los suelos y la vegetación, y a la calidad del agua en el destino. El resolutivo no incluye condicionantes sobre el abatimiento del nivel freático ni sobre el hundimiento regional, que fueron el problema de lumbreras como la L-12, donde el bombeo real superó los 600 L/s frente a los 4.6 L/s estimados (capítulo 12). Es una limitación del tipo de evaluación y no una omisión de Conagua, porque la MIA mide impactos del proyecto sobre el ambiente y el hundimiento de L-12 fue un riesgo del ambiente sobre la obra; aun así, el abatimiento afecta al acuífero y la autoridad pudo pedir su seguimiento.

POR QUÉ LA SEMARNAT LO AUTORIZÓ

Con base en los considerandos, la DGIRA concluyó que el proyecto era ambientalmente viable y lo autorizó de manera condicionada. Sus razones fueron siete.

1. No afecta áreas protegidas. El trazo no está en áreas naturales protegidas federales, estatales ni municipales, ni en regiones prioritarias de la Conabio.
2. Es compatible con el ordenamiento ecológico. En el Estado de México rige el ordenamiento ecológico regional y el proyecto atraviesa cuatro unidades ecológicas (Ag-1-90, Ag-4-30, Ag-4-73 y Fo-2-164), sin criterio que lo limite o prohíba. En Hidalgo rigen las unidades de gestión ambiental XXVIII y XXXI, con política de restauración, tampoco prohibitivas.
3. No se requiere remover cubierta forestal. Al construirse en zonas urbanizadas, la política de conservación no aplica.
4. El sistema ambiental ya está degradado. Se delimitó una zona de influencia de 100 m a cada lado del eje, ampliada a 25,426.40 ha en torno a la presa Endhó y el portal. La DGIRA la consideró fuertemente perturbada por urbanización, agricultura, vialidades y canales de aguas residuales.
5. Los impactos de preparación y construcción (aire, ruido, residuos) se consideran no significativos por temporales.
6. La operación no aumenta de forma significativa la descarga. Conagua manifestó que el volumen descargado a Endhó no se incrementa de modo significativo, y la DGIRA lo tomó como mejora si se construyen las plantas.
7. El proyecto reduce el riesgo de inundación, su finalidad declarada.

El sexto argumento choca con el propio resolutivo. La Semarnat usó la transferencia entre cuencas para justificar su competencia federal, por los impactos acumulativos, y luego aceptó que el volumen no aumentaba de forma significativa. La condicionante 2 reconoce además que la capacidad de tratamiento prevista era insuficiente.

Tampoco se evaluaron alternativas. En la fracción VII del artículo 12 del REIA la DGIRA se limita al pronóstico sin proyecto frente a con proyecto. La MIA-P confirma la ausencia: su capítulo VII se titula "Pronósticos ambientales y, en su caso, evaluación de alternativas", pero solo desarrolla el pronóstico y el programa de vigilancia, sin comparar trazos ni tecnologías (MIA-P, cap. VII, pp. 100-101). La decisión se evaluó, la alternativa descartada no.

La autorización fue razonable en lo ambiental local. El trazo corre casi todo por suelo urbano y agrícola degradado, y es difícil sostener que un túnel a 40 o 150 m de profundidad dañe un ecosistema que ya no existe. El punto débil es el tiempo: 28 días para un trámite que cubre 62 km y tres entidades, sin consulta pública y sin alternativas comparadas, y con una condicionante central, la ampliación de las plantas, que condiciona el destino del agua conducida.

03

Normatividad aplicable

Las normas de ductos de hidrocarburos y las NMX de concreto, agregados, cemento y acero están en el capítulo 8. Esta parte reúne lo ambiental, el agua, la seguridad laboral y las leyes asociadas al TEO. Cada número y fecha se verificó en la ficha del Catálogo Mexicano de Normas (PLATIICA, Secretaría de Economía) o en el texto publicado en el DOF, con consulta del 10 de octubre de 2026.

MARCO POR DEPENDENCIA

Conagua es la dueña y promovente. La Semarnat evalúa y autoriza; la Profepa vigila el resolutivo. La STPS regula la seguridad de los trabajadores. La ASEA y Pemex entran en los cruces con ductos de hidrocarburos. Las autoridades de la Ciudad de México, el Estado de México e Hidalgo otorgan los permisos locales que el resolutivo no sustituye (término tercero).

TABLA 18.7. DEPENDENCIAS Y SU PAPEL NORMATIVO EN EL TEO

DEPENDENCIA	PAPEL EN EL TEO	INSTRUMENTOS PRINCIPALES
Conagua (Semarnat)	Dueña y promovente; autoridad del agua; contratante	Ley de Aguas Nacionales y su reglamento; MAPAS; Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados
Semarnat (DGIRA)	Evaluó y autorizó la MIA	LGEEPA; REIA; NOM ambientales
Profepa	Vigila el cumplimiento del resolutivo	REIA, arts. 55, 59 y 61
STPS	Seguridad y salud de los trabajadores de la obra	NOM-031-STPS-2011; NOM-033-STPS-2015
ASEA y Pemex	Cruces con ductos de hidrocarburos	Capítulo 8
Autoridades locales	Permisos locales, usos del suelo, agua estatal	Leyes ambientales y de agua estatales

LEYES Y REGLAMENTOS FEDERALES

TABLA 18.8. LEYES Y REGLAMENTOS FEDERALES RELEVANTES.

INSTRUMENTO	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA	RELACIÓN CON EL TEO
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	DOF 28-01-1988; última reforma consultada en el portal de la Cámara de Diputados: 19-01-2026	Art. 28 fracción XIII y art. 5 fracción XX: fundamento de la MIA federal
Reglamento de la LGEEPA en materia de evaluación del impacto ambiental (REIA)	DOF 30-05-2000; última reforma 31-10-2014	Arts. 5 inciso R), 12, 44 y 47 a 50
Ley de Aguas Nacionales	Reformada por el decreto del 11-12-2025, que expide la Ley General de Aguas; en vigor desde el 12-12-2025	Concesión de aguas nacionales

INSTRUMENTO	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA	RELACIÓN CON EL TEO
Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos	DOF 08-10-2003; última reforma 19-01-2026	Plan de manejo de residuos de la obra
Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable	DOF 05-06-2018, que abrogó la de 2003; última reforma 01-04-2024	Remoción de vegetación en lumbreras
Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas	DOF 04-01-2000; reformas en 2025 (16-04 y 14-11)	Contratación de la obra; los contratos del TEO se firmaron con la ley de 2000 vigente
Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos	DOF 07-04-1993; última reforma 20-11-2012	Traslado de residuos peligrosos de la obra

Las leyes locales aplicables son la Ley Ambiental del Distrito Federal, la Ley de protección al ambiente para el desarrollo sustentable del Estado de México, la Ley del Agua del Estado de México, la Ley de Aguas del Distrito Federal y los reglamentos de ruido y de limpia del Distrito Federal y de la Ley del Agua mexiquense. Los nombres corresponden a la normativa vigente en 2008-2014; varias fueron reformadas desde que el Distrito Federal pasó a ser Ciudad de México.

NORMAS OFICIALES MEXICANAS AMBIENTALES

El resolutivo cita normas que ya habían cambiado cuando se firmó. En junio de 2008 regían las versiones 2006 de las NOM de emisiones de vehículos y la NOM-052 de 2005, y el oficio cita todavía las de 1999 y 1993. Desde entonces ambas se sustituyeron otra vez.

TABLA 18.9. NOM AMBIENTALES RELEVANTES Y SU VIGENCIA

NORMA	TEMA	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA
NOM-041-SEMARNAT-2015	Límites de gases contaminantes del escape de vehículos en circulación que usan gasolina	DOF 10-06-2015, en vigor desde el 08-09-2015; vigente. Sustituyó a la de 2006
NOM-045-SEMARNAT-2017	Opacidad del humo de vehículos en circulación que usan diésel	DOF 08-03-2018; vigente. Sustituyó a la de 2006

NORMA	TEMA	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA
NOM-052-SEMARNAT-2005	Características, identificación, clasificación y listados de residuos peligrosos	DOF 23-06-2006, en vigor desde el 21-09-2006; vigente (hay una modificación en el programa de infraestructura de la calidad)
NOM-053-SEMARNAT-1993	Procedimiento de la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad	DOF octubre de 1993; es la referencia de la NOM-052-SEMARNAT-2005
NOM-054-SEMARNAT-1993	Incompatibilidad entre residuos peligrosos	DOF 22-10-1993; vigente
NOM-080-SEMARNAT-1994	Ruido del escape de vehículos automotores, motocicletas y triciclos motorizados en circulación	DOF 13-01-1995, en vigor desde el 14-01-1995; vigente. Excluye la maquinaria pesada de construcción
NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012	Límites máximos de hidrocarburos en suelos y lineamientos de muestreo y remediación	DOF 10-09-2013; sustituyó a la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, que a su vez sustituyó a la de emergencia NOM-EM-138-ECOL-2002
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio	DOF 02-03-2007; vigente
NOM-003-SCT/2008	Características de las etiquetas de envases y embalajes para el transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos	DOF 15-08-2008, en vigor desde el 14-10-2008; vigente. Sustituyó a la NOM-003-SCT/2000
NOM-001-SEMARNAT-2021	Límites de contaminantes en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación	DOF 11-03-2022; en vigor el 11-03-2023, con parámetros de las tablas 1 y 2 desde el 03-04-2023 y color verdadero y toxicidad al cuarto año. Sustituyó a la de 1996
NOM-002-SEMARNAT-1996	Límites de contaminantes en descargas a sistemas de alcantarillado urbano o municipal	DOF 03-06-1998; vigente

NORMA	TEMA	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA
NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos para la construcción de pozos de extracción de agua y prevención de contaminación de acuíferos	DOF 03-02-1997; vigente; Conagua tiene en proceso una norma que la cancelaría
NOM-011-CONAGUA-2015	Método para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales	DOF 27-03-2015, en vigor desde el 26-05-2015; vigente

La NOM-001-SEMARNAT-2021 es la que regiría el agua que se descargue a un cuerpo receptor nacional tras la PTAR de Atotonilco. La NOM-001-SEMARNAT-1996 ya no existe. Las dos últimas filas no se citan en el resolutivo; se incluyen porque el abatimiento de lumbreras como la L-12 exigió extraer y descargar agua subterránea, y esas normas son las que regulan esa actividad.

SEGURIDAD LABORAL

TABLA 18.10. NORMAS DE LA STPS

NORMA	TÍTULO OFICIAL	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA	RELACIÓN CON EL TEO
NOM-031-STPS-2011	Construcción. Condiciones de seguridad y salud en el trabajo	DOF 04-05-2011, en vigor desde el 04-11-2011; vigente	Aplica a la obra; el túnel y las lumbreras son construcción. Los requisitos de trabajo subterráneo están en el capítulo 20
NOM-033-STPS-2015	Condiciones de seguridad para realizar trabajos en espacios confinados	DOF 31-08-2015, en vigor desde el 30-11-2015; vigente	Aplica a lumbreras y a trabajos dentro del túnel, en particular a los trabajos del tramo de L-8A a L-8B con H ₂ S registrado (capítulo 17)

AGUA Y OBRA HIDRÁULICA

Los Manuales de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de Conagua son el criterio de diseño de colectores y emisores. Existe una edición del libro de alcantarillado sanitario con fecha de portada de diciembre de 2009, y una cita académica lo ubica como libro 20 de la edición de 2015. No es una norma obligatoria por sí misma. En el contrato se aplican las especificaciones que indica la Comisión.

CÓMO SE CUMPLIÓ

El resolutivo convierte parte de este marco en obligaciones concretas: cumplir las NOM aplicables, presentar el programa de protección de suelos en tres meses, reforestar con especies nativas y entregar informes semestrales durante la construcción. El cumplimiento de las condicionantes se documenta en los informes semestrales y anuales, el programa de protección de suelos, la propuesta de ampliación de la planta de El Salto, las constancias de Profepa y la segunda MIA de 2010, que se consultan por solicitud de transparencia a la Semarnat, Conagua y Profepa (capítulo 23). La supervisión de la obra reporta el seguimiento sistemático del resolutivo, aunque se trata de un trabajo de gestión de calidad y no de una auditoría ambiental.

SÍNTESIS

1. La MIA se evaluó bajo la LGEEPA (arts. 5 fracción XX y 28 fracción XIII) y el REIA, y se autorizó de manera condicionada con 16 términos y 5 condicionantes.
2. Las NOM de emisiones, residuos, suelos, etiquetas y descargas que cita el expediente se sustituyeron: 041 (2015), 045 (2017), 138 (2012), 003-SCT (2008) y 001 (2021).
3. La Ley de Aguas Nacionales cambió a fines de 2025 con la expedición de la Ley General de Aguas.
4. El resolutivo de 2008 establece qué debía hacer la obra; su cumplimiento se verifica con los informes de las condicionantes (capítulo 23).

A photograph showing two workers in safety gear (hard hats, reflective vests, and dark clothing) standing on a metal platform inside a large, curved industrial structure. One worker is on the left, and the other is on the right, leaning over a railing. A large yellow hose is coiled around a central vertical pipe. The structure has a curved, metallic ceiling with several small, triangular-shaped openings. The overall scene is dimly lit, with some light coming from the workers' headlamps and the platform's lighting.

Parte II • La línea de conducción del TEO

19

Operación, mantenimiento y tratamiento

Lo que ha pasado desde 2019 y la planta de Atotonilco

El TEO comenzó a operar el 3 de diciembre de 2019. Este capítulo separa lo oficial de las declaraciones y de lo que reporta la prensa, y revisa la operación, el mantenimiento, la PTAR y lo ocurrido en Tula en septiembre de 2021.

Los principios de inspección y mantenimiento se explican en el capítulo 8 y el funcionamiento hidráulico y la eficiencia del TEO en el 17; aquí se trata la operación del TEO y la planta que recibe su agua.



Figura 19.1. Del Valle de México al río Tula

La PTAR Atotonilco trata aguas residuales; no las potabiliza.

01

Lo que dicen los documentos oficiales

El comunicado 851-19 de Conagua es el acta de arranque. Dice que el TEO mide 62 km y 7 m de diámetro, tiene 25 lumbreras de 25 a 145 m de profundidad (145 m es la profundidad de proyecto de la L-20; la ASF redondea el máximo a 150 m) y conduce hasta 150 m³/s (150 mil litros por segundo). Reporta 142,226 t de acero, 1.3 millones de m³ de concreto y 4.7 millones de m³ excavados, con más de 4,000 personas trabajando cada mes.

En el mismo acto, la jefa de Gobierno, Claudia Sheinbaum, dijo que para aprovechar el túnel faltaban obras complementarias que ya estaban en proceso. Es una declaración oficial: el TEO no iba a funcionar solo.

Dato técnico: el comunicado da 145 m de profundidad máxima; la ASF habla de 25 a 150 m y la prensa técnica también cita 150 m. Este capítulo usa el rango 25 a 150 m de la ASF, que es el documento de fiscalización más reciente, y menciona los 145 m cuando cita a Conagua.

La ASF registra que la construcción de los 62.4 km y las 25 lumbreras terminó el 4 de diciembre de 2019 y que en 2020 se hizo el cierre administrativo del proyecto. Ese informe, de la Cuenta Pública 2020, es el primer documento de fiscalización posterior a la entrega. Reporta que el contrato principal sumó 20,702.8 millones de pesos y 3,911 días naturales, y que el acta de finiquito, del 19 de diciembre de 2020, fijó un monto real ejercido de trabajos normales de 20,636.6 millones. La ASF determinó 32.3 millones de pesos pendientes por aclarar en esa cuenta pública. El desglose de montos está en el capítulo 20.

Antes de la entrega, el avance físico de la obra a junio de 2018 se desglosa por tramo en el Libro Blanco de Conagua (2018, pp. 194-199). Las 25 lumbreras estaban terminadas y el tramo 1, de la L-0 a la L-5, al 100 % en excavación, revestimiento definitivo y dovelas (9,984 m excavados y 6,661 anillos). En el conjunto se habían excavado y revestido con dovelas 57,076 m de 61,982 m (92.1 %), el revestimiento definitivo cubría 43,740 m de 62,177 m (70.3 %) y se habían fabricado 41,067 de 41,338 anillos (99.3 %); el avance del túnel era de 56.7 km de 62.4 km, es decir 90.8 %. El porcentaje del revestimiento definitivo es el que más rezagaba la obra, sobre todo en los tramos 5b (0 %) y 6b (0 %), donde la excavación aún no terminaba o acababa de hacerlo.

La misma auditoría describe cómo se concibió la operación. El túnel tiene una capacidad de desalojo por gravedad de 150 m³/s con una pendiente aproximada de 0.0016, funciona junto con el drenaje profundo en lluvias y en estiaje opera de forma alternada

para permitir su mantenimiento. Antes de la inauguración ya había operación parcial: los primeros 10.1 km, de la L-0 a la L-5, entraron en 2013 con la planta de bombeo El Caracol. En 2017 Conagua informó que ese tramo desalojaba hasta 40 m³/s.

02

Cómo se opera y quién lo opera

La operación del TEO se reconstruye a partir de tres piezas.

La primera es el organismo. Conagua opera las grandes estructuras del sistema a través del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, que en el plan de lluvias de 2025 se presentó como la torre de control del sistema. Conagua tiene entre sus cuatro funciones principales la protección de la población ante fenómenos hidrometeorológicos y la operación de infraestructura hidráulica. El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX, hoy bajo la Secretaría de Gestión Integral del Agua) opera la red primaria y secundaria de la ciudad y las plantas de bombeo que le entregan al drenaje profundo. La Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) hace lo propio en su territorio. En el límite de las tres jurisdicciones está la lumbrera L-0, donde el TEO recibe del interceptor Río de los Remedios.

La segunda pieza es el Protocolo de Operación Hidráulica del Valle de México, un acuerdo anual entre Conagua, SACMEX y CAEM para coordinar el sistema primario de drenaje; las bitácoras de su aplicación son las que cita Animal Político para Tula. En el plan presentado en el C5 el 15 de mayo de 2025 el protocolo se activa cuando la lluvia promedio llega a 8 mm en las estaciones meteorológicas o cuando el drenaje profundo alcanza entre 5 y 6 m de tirante, con el Servicio Meteorológico Nacional como primera alerta. El protocolo de 2025 cubre 41 estructuras hidráulicas, algunas en Hidalgo porque los afluentes terminan en el río Tula, y la temporada fue del 15 de mayo al 31 de octubre. Una versión citada por la prensa en 2021 hablaba de 28 estructuras, entre ellas el drenaje profundo (TEC y TEO) y el Gran Canal; la diferencia corresponde a versiones distintas del protocolo.

La tercera pieza es la consigna de operación. Un exdirector de Conagua, José Luis Luege, explicó a Animal Político que la instrucción de la comisión metropolitana era aguantar al máximo el llenado de los sistemas de la ciudad antes de expulsar agua hacia Tula, y el protocolo establece que ante pronósticos de lluvia severa los sistemas de regulación deben estar vacíos o vaciándose. Esta lógica explica por qué el TEO no corre siempre: en agosto de 2019 Conagua dijo que estaba listo para operar, pero que se usaría solo cuando lo pidieran la lluvia, los almacenamientos y los protocolos.

En 2020 Conagua informó que el TEO había entrado en funcionamiento en diversas ocasiones durante las lluvias para acelerar el desalojo y evitar inundaciones en la Ciudad de México. Ese boletín interno da 35 mil litros por segundo como capacidad, cifra que se aparta de los 150 mil de los demás documentos de la propia comisión.

03

Mantenimiento: dos túneles para poder revisarlos

El diseño nació de un problema de mantenimiento. El Emisor Central abrió en 1975 con 170 m³/s y por no poder cerrarse trabajó cerca de 19 años sin mantenimiento mayor; en 2013 la Evaluación K131 estimaba su capacidad en 110 m³/s y Conagua hablaba de 120. Una publicación de Conagua reconoce que es el ducto del que depende el desalojo del valle y que debe cerrarse en estiaje para repararlo, razón por la que se necesitaba un segundo túnel (Conagua, s/f, folleto del TEO).

La alternancia funciona así. En estiaje, cuando el gasto base es de decenas de m³/s, un túnel basta para llevar el agua y el otro se cierra con sus compuertas. Se desagua el tramo, se entra por las lumbreras, que sirven de acceso a personal, maquinaria y material, y se inspecciona y repara. Después se invierten los papeles. Antes del TEO esta maniobra no era posible sin dejar a la ciudad sin salida profunda.

El mantenimiento posterior a 2019 se describe en los comunicados y presentaciones de Conagua y SACMEX de 2020 a 2026: desazolve de ríos y presas, reparación de compuertas, mantenimiento de bombeos y mantenimiento preventivo de lumbreras, válvulas y pasos a desnivel del drenaje profundo. Algunas cifras de esas acciones:

1. En el plan de lluvias de 2025, Conagua dijo haber invertido 380 millones de pesos en desazolve de presas y ríos, reparación de compuertas y mantenimiento de bombeos, con equipo especializado como unidades de caja seca, retroexcavadoras de brazo largo y equipos hidroneumáticos.
2. En 2026, Conagua invirtió 312 millones de pesos en desazolves, con un volumen estimado de 750 mil m³ en 68.4 km de ríos.
3. SACMEX reportó en su operativo de 2023 que su programa cubre una red primaria de 26 km y una secundaria de 3,319 km, y que al 30 de abril se habían extraído 254,850 m³ de azolve y 2,087 t de basura.
4. Las tres grandes plantas de bombeo (El Caracol, Central de Bombeo Oriente y El Bosque) tienen una capacidad conjunta de 120 m³/s.

En estiaje, cuando el gasto base es de decenas de m³/s, un túnel basta para llevar el agua y el otro se cierra con sus compuertas

Los especialistas del Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) señalan el mantenimiento como el mayor reto del sistema. En julio de 2026, su vicepresidente técnico, Andrés Moreno y Fernández, propuso una inspección integral de túneles e

interceptores, muchos sin revisión desde su construcción, y el expresidente Luis Salazar recordó que una revisión de 2007 detectó deterioros importantes en algunos interceptores. Un investigador de la UNAM, José Alberto Nochebuena, añadió que de algunos túneles no se conoce el estado y señaló al Interceptor Poniente, de unos 60 años. Son opiniones de expertos, no resultados de inspección.

Los métodos de inspección de túneles (cámaras, robots, sonar, topografía láser) se tratan en el capítulo 8 de la Parte I.

La capacidad de alternar existe y es el mayor beneficio de mantenimiento de la obra, porque por primera vez desde 1975 se puede sacar de servicio un túnel profundo. Esa capacidad solo se convierte en seguridad si el cierre se programa cada estiaje y sus resultados se documentan: una estructura sin bitácora pública de inspección no puede ser revisada por terceros, y las bitácoras de inspección interior son la evidencia que una auditoría pediría primero.

04

Lo que se dice sobre su efecto

En febrero de 2019, la titular de Conagua, Blanca Jiménez, dijo que el TEO subiría la capacidad conjunta del drenaje de 320 a 470 m³/s. El aumento es de 150 m³/s, un 47 % sobre 320 (cálculo propio; la nota lo redondea a "50 por ciento"):

$$\Delta = \frac{470 - 320}{320} \times 100 = 46.9 \%$$

donde: el numerador es el aumento de capacidad conjunta, en m³/s, y 320 es la capacidad previa, también en m³/s. El resultado es porcentual.

En septiembre de 2020, Jiménez afirmó que el drenaje fue insuficiente, pero que las inundaciones en la Ciudad de México fueron menores gracias al túnel. En julio de 2020, el boletín oficial Somos Conagua ya había dicho que el TEO entró en funcionamiento varias veces durante las lluvias de ese año.

El 14 de mayo de 2026, el director de Conagua, Efraín Morales López, presentó en la conferencia matutina las obras para la temporada de lluvias: la laguna El Salado de 300 mil a 400 mil m³, un cárcamo en Bordo de Xochiaca de 16 mil L/s y desazolve de 19 ríos. La crónica no menciona el TEO; las obras complementarias siguen seis años después de su entrada en operación.

En 2025 Conagua presentó otras: la laguna Casa Colorada, con un vaso regulador ampliado de 150 mil a 2 millones de m³ y una conducción de 20 a 40 m³/s. En marzo de 2026, el encargado del Proyecto de Agua del Valle de México, Roberto Capuano Tripp, dijo en el CICM que apostar solo por grandes túneles emisores hacia Hidalgo no resuelve de fondo las inundaciones, que el mayor problema está en el oriente, donde el hundimiento volvió obsoleta la infraestructura, y que el nuevo enfoque busca regular y absorber agua en el valle para liberarla de forma controlada.

Este documento no cuantifica cuánto redujo el TEO las inundaciones: presenta lo que afirman Conagua y la prensa, que coinciden en dirección.

05

La planta de Atotonilco: 35 m³/s frente a 150

La PTAR está en el municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo, en la localidad de Conejos, entre las localidades de San José Acoculco y Melchor Ocampo (El Salto), de Tepeji del Río, sobre un terreno de 158 ha, junto al portal de salida del Emisor Central, donde acaban los túneles y empiezan los canales de riego del Valle del Mezquital (Conagua, Programa). El túnel evita inundaciones en la ciudad. La planta trata parte del agua que sale.



Figura 19.2. TEO de 150 m³/s frente a la capacidad de la PTAR

CÓMO SE COMPONE LA CAPACIDAD

Las cifras publicadas de capacidad difieren porque miden cosas distintas. Este documento usa 35 m³/s como capacidad instalada, que coincide con el inventario de Conagua, cuya cifra de 35,000 l/s se repite desde la edición de 2019 hasta la de 2022.

TABLA 19.1. CAPACIDAD DE LA PTAR ATOTONILCO

CONCEPTO	VALOR
Capacidad media instalada	35 m ³ /s
Módulo base	23 m ³ /s
Módulo de lluvia	12 m ³ /s
Capacidad media en lluvias	42 m ³ /s
Máximo de diseño	50 m ³ /s
Caudal tratado en 2025	31.7 m ³ /s
Aguas residuales del Valle de México que trata	cerca de 60 %

$$V_d = Q \times 86\,400 = 35 \times 86\,400 = 3\,024\,000 \text{ m}^3/\text{d}$$

donde: V_d es el volumen diario en $\text{m}^3/\text{día}$, Q es el gasto en m^3/s y 86,400 es el número de segundos en un día.

UBICACIÓN Y TREN DE TRATAMIENTO

La disposición general incluye rejillas, desarenadores, clarificadores primarios, reactores biológicos, clarificadores secundarios, filtración, cloración, un tren de lodos y un área de cogeneración, junto al canal Salto-Tlamaco y al río El Salto (Conagua, Programa, diapositiva "Arreglo general"). Tiene dos líneas de agua. Acciona las llama línea biológica convencional y línea fisicoquímica: la primera trata $27.6 \text{ m}^3/\text{s}$ medios en lluvias y la segunda 14.4 , lo que suma los $42 \text{ m}^3/\text{s}$ de esa temporada (Acciona, s/f).

1. Pretratamiento en ambas líneas: rejillas y desarenadores.
2. Línea biológica convencional: sedimentación primaria, lodos activados con 24 módulos de reactores aerobios y 24 clarificadores secundarios, y cloración (Ayesa, s/f; infra.global, s/f).
3. Línea fisicoquímica, para los excedentes de lluvia: coagulación con cloruro férrico, floculación con polímeros, decantación lamelar y cloración. WaterWorld agrega espesadores y filtros rotatorios de malla.
4. Tratamiento de lodos: espesamiento por gravedad, digestión anaerobia, deshidratado en centrífugas y disposición.
5. Cogeneración con el biogás de la digestión.

La descarga del efluente es por gravedad al río Tula o bombeada al canal Salto de Tlamaco, según las necesidades de riego.

Dato técnico: el Programa de Conagua de 2009 usa la sigla TPC (tren de procesos convencionales) y TPQ (tren de procesos químicos); Acciona usa línea biológica y línea fisicoquímica. Son los mismos trenes con distinto nombre. En el inventario oficial de Conagua el proceso de la planta figura como "Dual" en 2019 y 2020 y como "lodos activados" en 2021 y 2022.

Ese Programa presenta cuatro escenarios anuales de operación, con el tren convencional entre 22.5 y 27.6 m³/s y el químico hasta 14.4 m³/s, y estima que la planta entrega al riego, después del tratamiento, 24.3 mil toneladas de nitrógeno y 6.9 mil de fósforo por año (Conagua, Programa). La idea era que el tratamiento no quitara nutrientes al agrícola: el Programa afirma que menos del 1 % del agua se va en lodos.

LODOS, BIOGÁS Y ENERGÍA

Los lodos se estabilizan en 28 digestores anaerobios de 13,000 m³ cada uno, en dos grupos de 14, con deshidratado en dos centrífugas y diseño para cumplir la NOM-004-SEMARNAT-2002 para lodos y biosólidos, con disposición final en un monorrrelleno de secado. Los lodos se entregan a agricultores para fertilizar sus campos o a comunidades locales para mejoramiento de suelos, y el resto va a relleno (Acciona, s/f; infra.global, s/f). La partida de lodos y biosólidos y su disposición final está en el alcance del contrato.

El biogás se capta en una red y alimenta 12 generadores. Con esa fuente la planta consume 245 GWh/año y genera 197 GWh/año, con una reducción estimada de unas 400,000 t de CO₂ equivalente al año, con siete gasómetros de 8,500 m³. La fracción que cubre la generación propia es:

$$f = \frac{E_{gen}}{E_{con}} \times 100 = \frac{197}{245} \times 100 = 80.4 \%$$

donde: E_{gen} es la energía generada con biogás, en GWh/año; E_{con} es la energía consumida por la planta, también en GWh/año; f es la fracción de la demanda que cubre la generación propia, en porcentaje.

La ficha de sostenibilidad de Proyectos México menciona la cogeneración de energía eléctrica y calor para consumo interno como buena práctica y dice que la planta depura las aguas de 12.6 millones de habitantes.

CALIDAD DEL EFLUENTE Y NORMA

El diseño se hizo para cumplir la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establecía la calidad con que se descarga el agua a ríos y lagunas (Conagua, Programa). El reporte de Acciona del primer año de operación dijo un caudal medio de 31.5 m³/s y cumplimiento de los

estándares de calidad exigidos en el 100 % de las muestras. Es dato del operador, publicado por una revista del sector. En 2022 esa norma fue sustituida por la NOM-001-SEMARNAT-2021, que ya no clasifica los límites por uso del agua sino por tipo de cuerpo receptor (ríos, embalses, suelos, entre otros) y entró en vigor con un periodo de transición.

Dato técnico: el único dato de calidad del efluente es el porcentaje de muestras conformes que reporta el operador, por lo que no se calcula el cumplimiento por parámetro (DBO, sólidos, coliformes, huevos de helminto).

CONTRATO Y PUESTA EN MARCHA

El esquema es de diseño, construcción, operación y transferencia, con el consorcio Aguas Tratadas del Valle de México (ATVM), formado por Acciona Agua, Promotora del Desarrollo de América Latina (ICA), Atlatec, Desarrollo y Construcciones Urbanas y Green Gas Pioneer Crossing Energy. Es un contrato de prestación de servicios: Conagua paga una contraprestación con cargo a su presupuesto, que cubre operación, mantenimiento y financiamiento. Se adjudicó por licitación pública internacional, con convocatoria el 12 de mayo de 2009, propuestas el 3 de diciembre, fallo el 18 de diciembre de 2009, firma de contrato el 7 de enero de 2010 e inicio de la ejecución el 26 de julio de 2010.

La inversión varía según la fuente: 10,200 millones de pesos (Programa), 10,260 millones, una oferta ganadora de 9,389.2 millones y 560 millones de euros según Ayesa. En dólares, WaterWorld da 786 millones para el contrato de la planta y 1,400 millones para el programa completo. García-Salazar da 48.98 % de aportación pública y 51.02 % privada.

La fecha de arranque varía: 2016 según la ficha de Proyectos México y García-Salazar (2019); 2017 según la carta de *Salud Pública de México* (2026), que describe un funcionamiento parcial e intermitente entre noviembre de 2016 y noviembre de 2017; y

el balance de un año de operación de Acciona se publicó en julio de 2018. Los datos indican una puesta en marcha escalonada entre 2016 y 2017 y operación plena a partir de 2017. La serie oficial de caudal tratado empieza con el inventario de 2019.

CUÁNTO TRATA, AÑO POR AÑO

El inventario nacional de Conagua trae el caudal tratado por la planta de Atotonilco. Es la serie oficial anual disponible, y muestra que la planta pasó de tratar 77 % de su capacidad instalada en 2019 a 91 % en 2025.

TABLA 19.2. CAUDAL TRATADO EN LA PTAR ATOTONILCO SEGÚN LOS INVENTARIOS DE CONAGUA

AÑO DEL INVENTARIO	CAUDAL TRATADO (L/S)	PARTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO (L/S)	PARTE DEL ESTADO DE MÉXICO (L/S)	USO DE LA CAPACIDAD DE 35,000 L/S
2019	26,978.1	16,186.9	10,791.2	77 %
2020	28,743.2	17,245.9	11,497.3	82 %
2021	28,727.0	17,236.2	11,490.8	82 %
2022	30,847.2	18,508.3	12,338.9	88 %
2025	31,716	19,029.6	12,686.4	91 %

El uso de la capacidad es:

$$u = \frac{Q_{trat}}{Q_{inst}} \times 100 = \frac{31\,716}{35\,000} \times 100 = 90.6 \%$$

donde: Q_{trat} es el caudal tratado, en l/s; Q_{inst} es la capacidad instalada, en l/s; u es el uso de la capacidad, en porcentaje.

Con ese dato, la capacidad no usada en 2025 sería de 3,284 l/s (35,000 - 31,716). La nota de Milenio da 4,384, cifra que no cuadra con sus propios números. Los inventarios aclaran que la planta está contabilizada en Hidalgo aunque el agua que trata se genera en la Ciudad de México y el Estado de México, y que la proporción entre ambas es siempre de 60 y 40 por ciento aproximadamente.

QUÉ HACE EN LLUVIAS Y QUÉ NO

El hecho oficial: Conagua proyectó que el TEO descargara hasta 150 m³/s (170 en condiciones iniciales), el TEC hasta 120 (150 rehabilitado) y el río El Salto hasta 80, para una avenida máxima de descarga de hasta 400 m³/s al río Tula y la presa Endhó.

El cálculo propio: 35 m³/s de planta frente a 150 del TEO es un 23 %, y con el TEC incluido el cociente baja:

$$r = \frac{Q_{PTAR}}{Q_{TEO}} = \frac{35}{150} = 0.233 \quad r' = \frac{50}{150 + 120} = 0.185$$

donde: Q_{PTAR} es la capacidad instalada de la planta en m³/s, Q_{TEO} el gasto de diseño del TEO en m³/s, y 120 m³/s el del TEC. La segunda razón usa el máximo de la planta, 50 m³/s, contra la suma de ambos túneles. Ninguna es un dato publicado; son razones de capacidad de diseño.

En estiaje la comparación cambia. El Programa da un caudal promedio de 40 m³/s, de los cuales 36 irían a riego, y Conagua reporta 31.7 m³/s tratados en 2025 (años distintos, solo orientativo). Con una media tratada de 31.7 m³/s y una descarga promedio cercana a 40, la planta recibe en estiaje la mayor parte del agua. En lluvias, cuando los túneles descargan cientos de m³/s, el agua que supera la capacidad de la planta, entre 42 y 50 m³/s, se va por el río El Salto hacia el Tula sin pasar por la planta. Los excedentes de lluvia pasan por la línea fisicoquímica (Conagua, Programa) y el diseño contempla una avenida de descarga de hasta 400 m³/s al río.

COBERTURA DE TRATAMIENTO

La meta de cobertura es de 58 % (32 m³/s) en la Evaluación K131; otros documentos hablan de pasar de 6 % a 60 %. El Programa muestra una cobertura de 18.4 % en 2008 para el Valle de México y la Evaluación 2012 de Conagua habla de 11 %. Se usa 18.4 % porque viene del Programa de la propia Conagua que justifica la planta, y las otras se dan como rango.

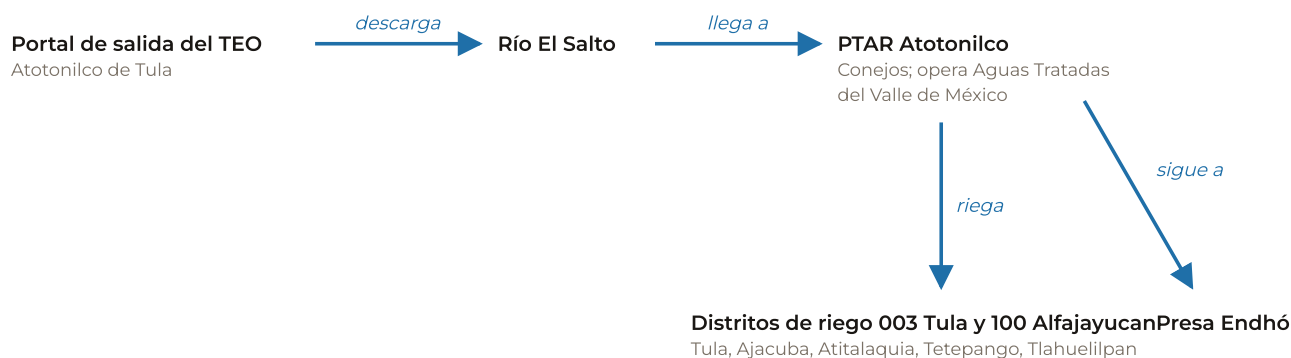
La cobertura de tratamiento de Hidalgo es 22.7 %, con 35,899 l/s de capacidad instalada y 493 l/s de caudal tratado. La capacidad estatal es casi toda la de Atotonilco, y el caudal tratado se mide por otro criterio, así que la comparación entre ambas cifras no es directa.

Riego en el Valle del Mezquital

Las aguas sin tratar del Valle de México riegan los distritos 003 Tula, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba. En la zona viven 700,057 personas; se estima que 300,000 dependen de la agricultura y 115,000 tienen contacto directo con aguas residuales (K131, p. 2). El agua tenía restricción para hortalizas de consumo en fresco bajo la NOM-001-SEMARNAT-1996 (K131, p. 14). En 2008, el 90 % del caudal, 36 de 40 m³/s, iba a riego sin ningún tratamiento (Conagua, Programa).

A dónde va el agua del TEO en el Valle del Mezquital

esquema de flujo, sin escala; no es un mapa



Inicio de operación de la planta: 2016 (García-Salazar, 2019); 2017, con operación parcial e intermitente en 2016-2017 (Félix-Arellano et al., 2026).

Elaboración propia con datos de ASF (2020, p. 2), Conagua (s/f) y García-Salazar (2019, pp. 3 y 21).

Figura 19.3. A dónde va el agua del TEO en el Valle del Mezquital

La promesa de Conagua era quitar restricciones a los cultivos, reducir enfermedades gastrointestinales y de piel, recargar acuíferos de forma controlada y no cobrar el tratamiento a los ejidatarios. Dijo que el agua tratada no se privatizaría y que la cantidad para riego no disminuiría significativamente (Conagua, Programa). La ficha de sostenibilidad oficial añade como beneficio económico el uso de tierras que no se cultivaban por la restricción de riego.

Las cifras de superficie cambian según la fuente: 80,000 ha de riego y 700,000 beneficiados (Acciona; Interempresas), unos 90,000 ha en el diseño original y alrededor de 100,000 ha de los distritos 003 y 100, con 250,000 personas en 28 municipios, según la secretaría ambiental de Hidalgo citada en un informe regional. Son definiciones distintas de lo que se cuenta.

Los estudios posteriores tratan tres temas.

Sobre la salud, un estudio de 880 niños menores de cinco años encontró más diarrea en comunidades que regaban con aguas residuales tratadas de forma intermitente o sin tratar que en las que usaban agua de pozo

(razones de momios de 2.68 y 3.58). El efecto fue mayor con agua sin tratar. Los autores apuntan que la planta operó de forma parcial e intermitente y que una campaña de desparasitación pudo influir. El Programa de 2009 había advertido que los niños de 4 a 16 años sufrían 16 veces más enfermedades diarreicas que en zonas con agua limpia (Conagua, Programa); esa cifra no se ha medido de nuevo.

La ficha de sostenibilidad oficial añade como beneficio económico el uso de tierras que no se cultivaban por la restricción de riego

Sobre el conflicto, los usuarios de los distritos 003 y 100 se oponen a la planta por el temor a tarifas más altas, menos volumen y menos nutrientes; los estudios de antes y después son escasos. Un reportaje de Milenio recoge que el delegado de Conagua en Hidalgo reconoció que campesinos del Valle del Mezquital se oponen a la planta.

Sobre el volumen, los campesinos señalan que su dotación es de 43 m³/s y que la planta trataría 20, así que habría menos agua; un ingeniero del portal de salida responde que el flujo aumentó con el TEO y que lo que crece es la superficie cultivada. Son testimonios de una tesis de antropología, no mediciones.

En marzo de 2026, Capuano Tripp mencionó en el CICM que el proyecto incluye fortalecer la planta de Atotonilco, reducir pérdidas en los distritos de riego, duplicar la disponibilidad de agua y sanear el río Tula, del que dependen los distritos. La declaración sugiere que el río sigue sin estar saneado a pesar de la planta.

El beneficio sanitario esperable es real, pero lo medido es poco: con una operación parcial hasta 2017, el único estudio epidemiológico citado captura el periodo de arranque y no el de régimen estable.

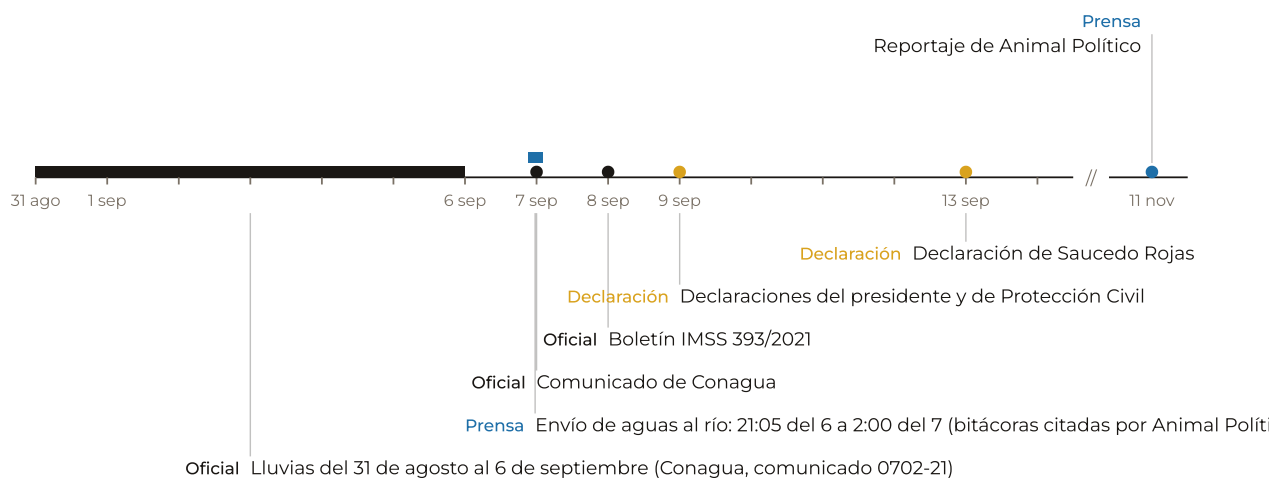
07

Tula, 6 y 7 de septiembre de 2021

Esta sección dice qué se sabe y quién lo dijo, sin sacar conclusiones sobre causas ni responsabilidades. Detrás de estos hechos hay muertes en un hospital, y las fuentes se citan con ese cuidado.

Septiembre de 2021 en Tula, hito por hito

quién dijo qué y cuándo; el tipo de fuente, por color



Elaboración propia; fuentes de cada hito en el texto del capítulo.

Figura 19.4. Tula, 31 de agosto a 13 de septiembre de 2021, por tipo de fuente

HECHO OFICIAL

El comunicado 0702-21 de Conagua dice que las lluvias del 31 de agosto al 6 de septiembre elevaron el almacenamiento de las presas y causaron desbordamientos, con nueve operativos de emergencia. El comunicado no menciona al TEO ni a Tula. El IMSS emitió el boletín 393/2021 sobre el Hospital General de Zona de Tula.

La MIA de Conagua de 2016 para las obras de protección contra inundaciones sobre el río Tula ante la descarga del TEO, autorizada por Semarnat en enero de 2017, establecía obras previas a la entrada en operación de la descarga: revestir de concreto 12 km del río y rectificar otros 7 km. Según Animal Político, que cita la MIA, las obras no se realizaron en ese momento. La MIA preveía también que la presa Requena mantuviera una reserva de entre 2.5 y 5 millones de m³ durante una tormenta, decidida con dos o tres días de anticipación, para aguantar hasta 48 horas sin desfogar.

DECLARACIONES DE FUNCIONARIOS, SEGÚN LA PRENSA

El titular de Conagua en Hidalgo, Eleazar Saucedo Rojas, dijo que con el TEO el río recibe del orden de 20 % más de caudal y que el TEO y el TEC operaron a máxima capacidad el lunes 6 de septiembre, con descargas de 220 a 270 m³/s hacia el río. La nota de Milenio habla de unos 220 m³/s en el momento más complicado, con 150 del TEO y cerca de 100 del TEC.

El presidente dijo que las inundaciones se deben, entre otras causas, a que varias presas están más allá de su capacidad. La coordinadora nacional de Protección Civil, Laura Velázquez, dijo que sí hubo alerta y evacuación, pero que el hospital quedó incomunicado. El director del IMSS, Zoé Robledo, dijo que ni el hospital ni la jefatura de prestaciones médicas ni la delegación en Hidalgo fueron advertidos, y el director de Conagua, Germán Martínez, afirmó que desde el 5 de septiembre se controlaba el volumen de la presa Requena, pero que el desfogue no fue suficiente.

Conagua emitió el 19 de septiembre de 2021 una alerta de que el caudal del TEC y del TEO podía desbordar el río Tula (ADN40).

INVESTIGACIÓN PERIODÍSTICA Y OPINIÓN

Animal Político, con bitácoras del Protocolo de Operación Hidráulica, reporta que entre las 21:05 del 6 de septiembre y las 2:00 del 7 Conagua, SACMEX y CAEM enviaron aguas pluviales y residuales al río Tula. Reporta también que las presas del sistema Tula estaban por encima de su capacidad: Requena en 102 % de su NAMO (41 millones de m³) el 4 de septiembre, 104 % el 5, 113 % el 6 y hasta 131 % entre el 7 y el 8; Endhó entre 103 % y 104 % del 2 al 6 y Taxhimay de 92 % a 100 %, según el monitor de presas

de Conagua citado por el medio. Requena y Endhó se desfogaron la madrugada del 7. La lluvia fue de unos 15 mm promedio en el Valle de México y cerca de 70 mm en Hidalgo, dentro de lo previsto según datos del SMN que cita el reportaje.

Esa nota agrega que el desbordamiento se ubicó hacia las 22:30 del 6 de septiembre, que el hospital empezó a inundarse hacia las 00:30 del 7 y que la nota informativa 80 de Protección Civil, enviada a las 18:43, hablaba de lluvias de 50 a 75 mm sin nombrar a Tula. Recoge también que un ingeniero civil y antropólogo, Dean Chahim, concluyó con datos de la NASA que Conagua no desfogó Requena pese a tener margen.

Una columna de S. Camarena retoma ese reportaje para cuestionar el manejo de la presa Requena.

LECTURA ACADÉMICA

Mota Celis escribe que el incremento de caudal desde 2019 y el impedimento para rectificar el cauce fueron los principales motivos de la inundación. Es una afirmación de una tesis de antropología, sin análisis hidráulico propio en el pasaje, y confunde la sigla del TEO con "Emisor Poniente".

DESPUÉS DEL EVENTO

Las obras de protección en el río Tula son posteriores. Según Criterio Hidalgo, que cita información oficial, Conagua y los gobiernos federal y estatal invirtieron más de 1,160 millones de pesos entre 2022 y 2024 en rectificación, desazolve y revestimiento, con lo que habría aumentado la capacidad hidráulica del río y se protegería a unos 30,000 habitantes; el 9 de julio de 2026 la presidenta Claudia Sheinbaum dijo que se mantienen acciones preventivas en Tula. Al cumplirse cinco años, la Gran Asamblea de Damnificados de Tula 2021, que reúne a representantes de 70 calles, dijo que persisten obras pendientes y responsabilizó a Conagua; el gobernador Julio Menchaca habló de recursos federales cercanos a 12 mil millones de pesos durante la administración actual y de 50 millones de pesos estatales para modificar el drenaje de la zona afectada. La misma nota habla de 17 personas muertas en total; el IMSS había reportado 14 pacientes fallecidos del hospital.

$$V = Q \times t = 220 \times 17\,700 = 3.89 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad 270 \times 17\,700 = 4.78 \times 10^6 \text{ m}^3$$

donde: Q es el gasto en m^3/s , tomado del rango citado por Saucedo; t es la duración en segundos entre las 21:05 y las 2:00 (4 h 55 min = 17,700 s); V es el volumen en m^3 si el gasto fuera constante.

ALCANCE DE ESTA SECCIÓN

Sobre el evento hay hechos documentados, declaraciones oficiales y una investigación periodística. La sección se limita a ellos y no resuelve las causas.

08

Qué se puede afirmar

El TEO está terminado y cerrado administrativamente desde 2020; que se inauguró el 23 de diciembre de 2019 y entró en funcionamiento en diversas ocasiones durante las lluvias de 2020; que la PTAR tiene 35 m^3/s de capacidad instalada y trató 31.7 m^3/s en 2025 según Conagua; que el diseño prevé alternar el TEO y el TEC en estiaje; y que en 2022 a 2024 se invirtió más de 1,160 millones de pesos en proteger el río Tula.

Los datos disponibles no permiten cuantificar la reducción de inundaciones atribuible al TEO, el agua que se va sin tratar en lluvias ni las inspecciones interiores. La causa de la inundación de Tula tampoco se resuelve: hay hechos, declaraciones y una investigación periodística.

Balance

El TEO cumple su función estructural: es un túnel de 62.4 km terminado, con 150 m³/s de capacidad de diseño, que por primera vez permite alternar y revisar el drenaje profundo. La PTAR convirtió una descarga cruda en un tratamiento de 31.7 m³/s, que en 2025 usa el 91 % de su capacidad, y es la obra que más cambia la calidad del agua del Valle del Mezquital.

El sistema, sin embargo, es más débil de lo que sugiere el túnel. La planta, con 35 a 50 m³/s, no puede tratar lo que el TEO y el TEC descargan en tormenta, que en 2021 fue de 220 a 270 m³/s según Conagua. Las obras del río Tula, que la MIA de 2016 pedía antes de la descarga, se hicieron años después. La fiscalización posterior a la entrega, como la ASF de 2020, revisa montos y finiquitos, no desempeño.

La distancia entre construir y operar es el resultado más relevante. Una obra pública de 150 m³/s se entregó con un cierre contable, pero sin un tablero público de gasto conducido, de días de operación ni de resultados de inspección. En una obra de esta escala, medir es parte del diseño. Publicar cada temporada tres cifras haría más defendible el beneficio del TEO: los m³/s conducidos, el nivel de las presas del sistema Tula y los días de cierre para mantenimiento. Con ellas se podría contestar con datos la pregunta que hoy contestan las declaraciones.

En resumen: el TEO está terminado y permite alternar los túneles del drenaje profundo para su mantenimiento, y la PTAR Atotonilco trata una parte creciente del agua que sale. La capacidad de la planta es una fracción de la del túnel en tormenta, y el desempeño del sistema se apoya en declaraciones y no en series publicadas de operación. Lo ocurrido en Tula en 2021 se limita a hechos y declaraciones, sin resolver causas.



Parte II · La línea de conducción del TEO

20

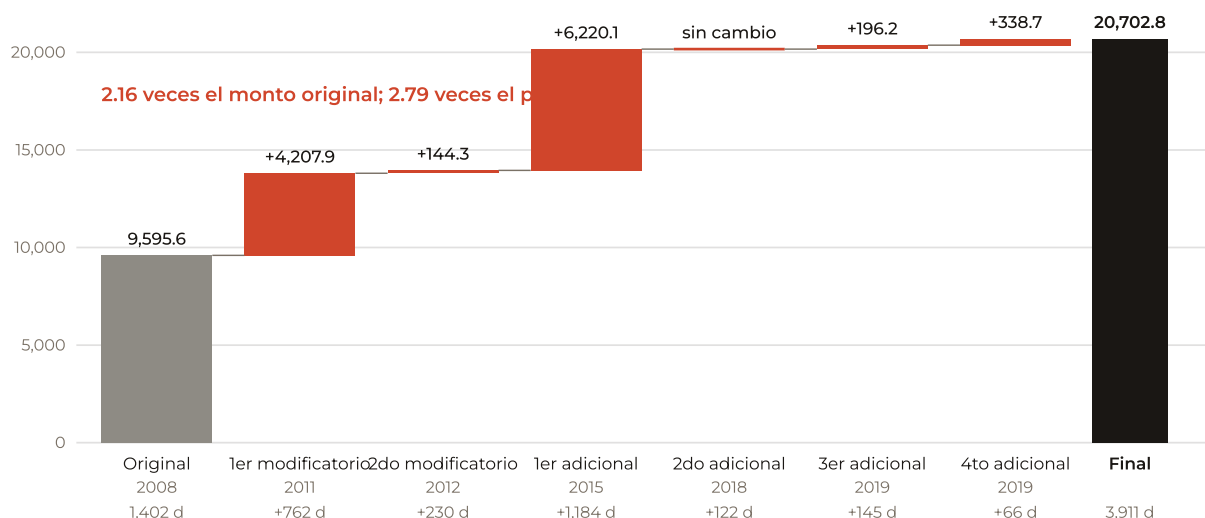
Gestión, costos y seguridad

Un contrato que se multiplicó por 2.16

El contrato de obra del TEO se firmó en 2008 por 9,595.6 millones de pesos y 1,402 días. Terminó en 20,702.8 millones y 3,911 días. La ASF auditó el gasto en 2012, 2018 y 2021 y encontró, en total, 2,117 millones por aclarar. El problema no estuvo en lo que se pagó mal, sino en lo que nadie sabía del terreno cuando se firmó.

Cómo creció el contrato de obra 08-008

millones de pesos, convenio por convenio



Plazo agregado en días naturales debajo de cada paso.

Elaboración propia con datos de ASF 2018-1727 (p. 4) y ASF 2021-0082 (p. 4); acumulados y razones, cálculo propio.

Figura 20.1. Monto del contrato de obra por convenio, de 9,595.6 a 20,702.8 millones de pesos

Este capítulo reúne tres cosas: los contratos, los costos y las auditorías (primera parte), la seguridad y los riesgos (segunda) y la cronología (tercera). La columna vertebral son los informes de la Auditoría Superior de la Federación (ASF), documentos oficiales; las tesis y los artículos técnicos sirven de contraste, y la prensa se marca como [Prensa].

Las normas de calidad y de seguridad que rigen una obra de este tipo se resumen en el capítulo 8; lo que sigue es cómo se contrató, cuánto costó y cómo se vigiló el TEO.

La pregunta que el diseño geotécnico no contesta es por qué una obra anunciada con un monto y un plazo terminó costando más del doble y tardando casi tres veces más. La respuesta de las fuentes es técnica y contractual a la vez: un proyecto ejecutivo que se desarrolló mientras se construía, una geología distinta de la prevista y un contrato mixto, de precios unitarios, precio alzado y tiempo determinado, que obligaba a renegociar cada vez que el terreno no coincidía con las suposiciones.

01

Contratos, costos y auditorías

FUENTES Y CONVENCIONES

Las cifras de contratos y convenios salen de tres informes de la ASF. La ASF ha auditado el proyecto en las cuentas públicas de 2008 a 2020, con excepción de 2016; el capítulo se apoya en los informes de 2012, 2018 y 2021.

TABLA 20.1. AUDITORÍAS DE LA ASF USADAS EN ESTE CAPÍTULO

CUENTA PÚBLICA	CLAVE	TIPO	UNIVERSO (MILES DE PESOS)	MUESTRA (MILES DE PESOS)	REPRESENTATIVIDAD	DICTAMEN
2012	12-0-16B00-04-0312 (DE-115)	Inversiones físicas	2,448,850.8	2,448,850.8	100.0 %	Limpio
2018	2018-5-16B00-22-1727-2019	Cumplimiento a inversiones físicas	2,504,068.4	1,475,869.9	58.9 %	"Cumplió, excepto" dos aspectos; 20 ene 2020
2021	2021-5-16B00-22-0082-2022	Cumplimiento a inversiones físicas, presencial	732,647.0	722,960.3	98.7 %	"Cumplió, excepto" cinco aspectos; 14 jun 2022

Los informes de la ASF expresan los montos en miles de pesos y los plazos en días naturales (d.n.). Aquí se convierten a millones de pesos (MDP) y en las tablas se conserva la cifra exacta. Las páginas citadas son las impresas en cada informe. Un pliego de observaciones es la acción con la que la ASF presume un probable daño a la Hacienda Pública, y el monto por aclarar es la suma de esas presunciones aún no justificadas: es la parte del gasto que la entidad no logró documentar ante la ASF, no una sentencia ni un desvío probado.

Dos precisiones rigen todo el capítulo. La contratación fue por adjudicación directa y no por licitación, como marca el sufijo "AD" de la clave del contrato; solo los dos contratos de asesoría administrativa de 2017 y 2018 fueron licitaciones públicas nacionales. Y la clave 200916B0001512 no es una clave de cartera de inversión de la SHCP, sino el registro del fideicomiso "Mandato del TEO".

FINANCIAMIENTO Y CIFRAS DE COSTO

La Conagua opera desde 2008 el programa K131 "Túnel Emisor Oriente y Central y Planta de Tratamiento Atotonilco", con dos obras: el TEO y la PTAR Atotonilco. El financiamiento federal se complementa con el Fideicomiso 1928, "Para Apoyar el Proyecto de Saneamiento del Valle de México". En 2013 el TEO tuvo un presupuesto modificado de 2,263.3 MDP y el fideicomiso aportó 1,870.9 MDP. En marzo de 2010 el esquema previsto era una inversión de 12,643 MDP sin IVA que incluía colectores y la planta de bombeo.

TABLA 20.2. ESQUEMA DE FINANCIAMIENTO PREVISTO EN 2010

APORTANTE	MILLONES DE PESOS	PARTICIPACIÓN
Gobierno Federal	6,943	54.9 %
Fideicomiso 1928: Gobierno del Distrito Federal	2,850	22.5 %
Fideicomiso 1928: Gobierno del Estado de México	2,850	22.5 %
Total	12,643	100.0 %

Por incluir colectores y la planta de Atotonilco, esa inversión no es comparable con el monto del contrato 08-008. La MIA-P del anteproyecto fijó la obra entre junio de 2008 y junio de 2012 y trae dos cifras: 16,460,543,786 pesos en el apartado II.1.4 y 12,000 MDP de obra más 780 de servicios, 12,780 MDP, en la tabla II.1 (MIA-P, cap. II).

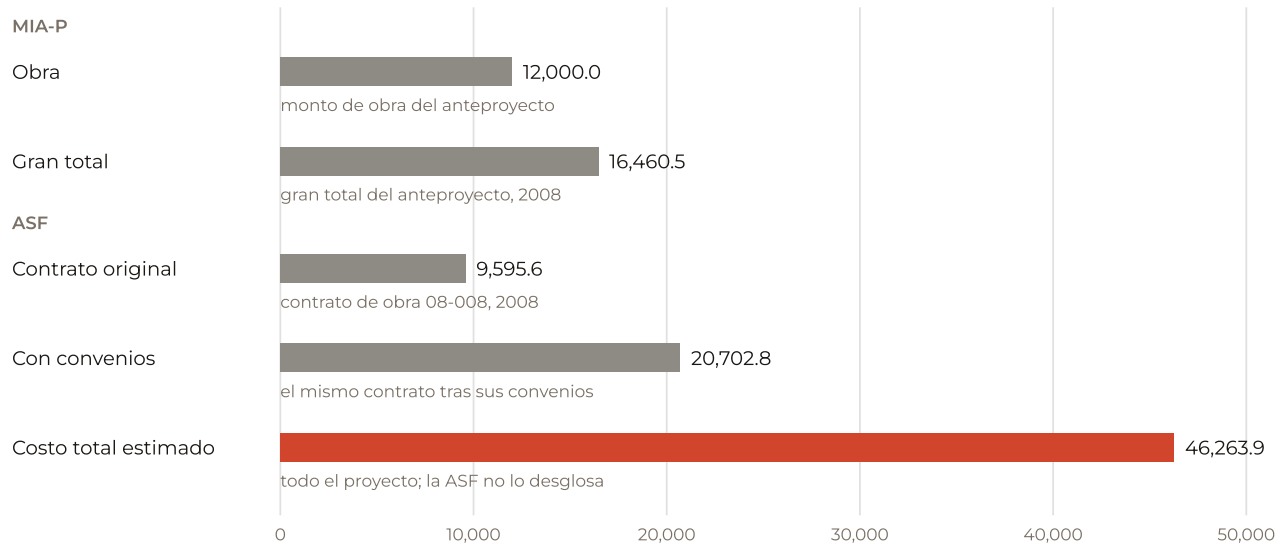
TABLA 20.3. CIFRAS DE COSTO DEL TEO SEGÚN EL ALCANCE Y EL MOMENTO.

CIFRA (MDP)	QUÉ ES
9,595.6	Monto original del contrato de obra 08-008, 14 de noviembre de 2008
11,035	"Monto original adjudicado" que reportó la prensa en 2017
12,000	Monto de obra del anteproyecto, 2008
12,780	Obra más servicios del anteproyecto, 2008
16,460.5	Cifra del apartado II.1.4 de la MIA-P, 2008
12,643	Esquema de financiamiento previsto en 2010
13,000	Costo previsto en 2010
20,702.8	Monto final del contrato de obra tras sus convenios
37,799	"Costo final" el día de la inauguración, según la prensa de 2019

CIFRA (MDP)	QUÉ ES
41,598	"Inversión oficial total" según la prensa de 2017
41,794.1	Costo total de inversión en el listado de proyectos de inversión, enero a marzo de 2024
46,263.9	Costo total estimado, con recursos presupuestales y del fideicomiso 1928

Cinco cifras de costo que no miden lo mismo

millones de pesos; misma escala



Elaboración propia con datos de Semarnat (2008a) y ASF (2019, 2022).

Figura 20.2. Cinco cifras de costo del TEO con alcances distintos, en millones de pesos

El Libro Blanco de la Conagua permite ver cuánto del gasto estaba autorizado en cada etapa. Suma 9,565.7 MDP autorizados de 2008 a 2012 y 21,520.9 MDP de 2013 a 2018, con un acumulado de 31,086.5 MDP. Por ejercicio, el presupuesto fue de 3,084.8 MDP en 2013, 2,518.2 en 2014, 3,363.2 en 2015, 3,913.0 en 2016, 3,600.0 en 2017 y 5,041.6 en 2018. Esa cifra queda por debajo de los 46,263.9 MDP de la ASF porque termina en 2018, antes de la excavación final y de los convenios de 2019. El Libro Blanco suma dos programas presupuestarios, K131 y K007 (este último denominado «Túnel Emisor Oriente y Planta de Tratamiento Atotonilco»), por lo que el acumulado no permite separar con precisión el gasto de cada obra.

EL CONTRATO DE OBRA SGAPDS-GIHP-DFMEXHGO-08-008-RF-AD

El contrato se celebró el 14 de noviembre de 2008. Es de obra pública mixta, a precios unitarios, precio alzado y tiempo determinado, adjudicado directamente por la Conagua, y cubre la elaboración del proyecto ejecutivo y la construcción del TEO en el Distrito Federal, el Estado de México e Hidalgo. El contratista es Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, S.A. de C.V. (COMISSA), en participación conjunta con Ingenieros Civiles Asociados, Carso Infraestructura y Construcción, Construcciones y Trituraciones, Constructora Estrella y Lombardo Construcciones. El consorcio repartió la obra en seis lotes de unos 10 km.

En la cláusula cuarta, las partes reconocen que, por la naturaleza de los trabajos, "no es posible determinar con precisión los alcances y cantidades". Si las condiciones reales varían respecto del estudio geológico o de las suposiciones de los precios, se determina un nuevo concepto y su precio. El contrato nació con un mecanismo de renegociación frente al riesgo geológico.

TABLA 20.4. CONTRATO DE OBRA 08-008: DATOS DE ORIGEN

CONCEPTO	DATO
Fecha	14 de noviembre de 2008
Monto original	9,595,580.5 miles de pesos
Plazo original	14/11/2008 a 15/09/2012, 1,402 d.n.
Metas físicas	7.0 m de diámetro, unos 62.3 km, hasta 150.0 m ³ /s
Metas físicas	7.0 m de diámetro interior, 62.4 km, profundidades de 25 a 150 m, 25 lumbreras, 150 m ³ /s, pendiente de 0.0016

POR QUÉ ADJUDICACIÓN DIRECTA

La Conagua adjudicó directamente el proyecto ejecutivo y la construcción a un consorcio mexicano, en lugar de licitar. Se atribuye a la necesidad inminente de las obras, al riesgo y la emergencia del sistema de drenaje y a la experiencia de las empresas, con la ventaja de acortar de 12 a 18 meses el inicio de los trabajos, contratar "a libro abierto" y generar empleo. En 2007 el presidente declaró una emergencia nacional y puso el proyecto como

prioridad del Programa Nacional de Infraestructura. A la ASF, la Conagua le entregó el escrito que acredita el criterio según los artículos 41 y 42 de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas y el dictamen de su Comité de obras públicas. La alternativa descartada fue la licitación pública con su plazo adicional; las fuentes no discuten una tercera vía, como licitar por tramos con el proyecto ejecutivo terminado.

Dato técnico: una tesis de 2010 afirma en la página 30 que hubo adjudicación directa y en la 41 que la licitación fue pública e internacional. Es una inconsistencia interna de esa fuente; prevalece la ASF.

El argumento de la urgencia es comprensible. El Emisor Central llevaba 19 años sin mantenimiento mayor y su capacidad había bajado de 170 a 110 m³/s, de modo que una falla amenazaba con una inundación generalizada. Pero los reportes técnicos reconocen el costo del atajo: un estudio de línea base que no se terminó sino hasta 2010, cuando el proyecto había empezado en 2008, y un reparto confuso de riesgos entre dueño y contratista. Un ejecutivo de la Conagua declaró a la prensa que el contrato original no tenía proyecto ejecutivo [Prensa].

La urgencia justificaba actuar con rapidez, pero no necesariamente renunciar a toda competencia. Queda una vía intermedia que las fuentes no exploran: adjudicar de inmediato el tramo 1, el más urgente, y licitar el resto con el proyecto ejecutivo avanzado. En residencia de obra, lo más costoso es construir sin proyecto terminado, y eso es lo que muestran los convenios: buena parte del costo adicional llegó por la vía de los ajustes al contrato.

CONVENIOS DEL CONTRATO DE OBRA

La ASF documenta seis convenios, cuatro hasta octubre de 2018 y dos de 2019 en el informe de 2021 (el cuarto adicional cierra el contrato). La tabla 20.5 los ordena y acumula monto y plazo; los acumulados son cálculo y coinciden con los totales que consigna la ASF.

TABLA 20.5. EVOLUCIÓN DE MONTO Y PLAZO DEL CONTRATO 08-008

N.º INSTRUMENTO	FECHA	INCREMENTO (MILES DE PESOS)	PLAZO AGREGADO (D.N.)	MONTO ACUMULADO (MILES DE PESOS)	PLAZO ACUMULADO (D.N.)
0 Contrato original	14/11/2008	9,595,580.5	1,402	9,595,580.5	1,402
1 1er convenio modificatorio	05/07/2011	4,207,935.9	762	13,803,516.4	2,164
2 2do convenio modificatorio	09/08/2012	144,288.8	230	13,947,805.2	2,394
3 1er convenio adicional	01/08/2015	6,220,144.6	1,184	20,167,949.8	3,578
4 2do convenio adicional (solo plazo)	26/10/2018	sin cambio	122	20,167,949.8	3,700
5 3er convenio adicional	22/02/2019	196,184.2	145	20,364,134.0	3,845
6 4to convenio adicional	19/07/2019	338,678.5	66	20,702,812.5	3,911

Al corte de abril de 2022 la ASF reporta el contrato finiquitado, con 20,636,599.1 miles de pesos ejercidos y 66,213.4 miles cancelados. Los indicadores derivados son estos.

$$\frac{20\,702\,812.5}{9\,595\,580.5} = 2.16, \quad \frac{3\,911}{1\,402} = 2.79, \quad \frac{4\,207\,935.9 + 144\,288.8 + 6\,220\,144.6}{20\,702\,812.5 - 9\,595\,580.5} = 0.952$$

donde la primera razón es el monto final sobre el original (aumento de 115.8 %, 11,107.2 MDP), la segunda es el plazo final sobre el original (10.7 años contra 3.8) y la tercera es la fracción del incremento de monto que concentran los tres primeros convenios. Los dos convenios de 2019 suman 534.9 MDP, 5.6 % del monto original.

Las fechas de terminación pactadas fueron el 15 de septiembre de 2012, el 17 de octubre de 2014, el 4 de junio de 2015, el 31 de agosto de 2018, el 31 de diciembre de 2018, el 25 de mayo de 2019 y el 30 de julio de 2019. La obra terminó de excavar el 23 de mayo de 2019 y la ASF fija en el 4 de diciembre de 2019 el término de la construcción de los 62.4 km.

Causas de los convenios. La ASF explica con detalle las causas de los dos primeros y de uno de los últimos.

TABLA 20.6. CAUSAS DOCUMENTADAS DE LOS CONVENIOS

CONVENIO	CAUSA
1er modificadorio	Trabajos adicionales por la modificación del método constructivo del tramo I y la lumbrera adicional L-3A
2do modificadorio	Cambio de trazo del tramo 6 y modificaciones en los tramos I (subtramo 1B), 2, 3, 5 y 6
1er adicional	Es el de mayor monto, 6,220.1 MDP, 56 % del incremento total; la ASF no detalla su causa
4to adicional	Aumento de costos indirectos por 110.2 MDP, que la ASF observa por falta de justificación

Tres hechos físicos explican buena parte de los primeros convenios.

1. Las lluvias de febrero de 2010 inundaron el tramo 1 y la zona de trabajo. La tuneladora prevista para el tramo 5 se usó para apoyar el tramo 1 y se construyó la lumbrera L-3A para extraer las máquinas; la de la L-5 terminó el subtramo 1B el 1 de octubre de 2012 y la de la L-0 el subtramo 1A el 19 de diciembre de 2012. La ASF confirma la inundación de los días 3 y 4 de febrero de 2010 y la rehabilitación de la tuneladora HK S-497, propiedad de la Conagua.
2. La Conagua autorizó en enero de 2011 el cambio de trazo del tramo 6 para disminuir el riesgo de atrapamiento de la tuneladora HK S-519 en vulcanitas muy fracturadas. Exigió ingeniería complementaria y tres lumbreras nuevas (L-21A, L-23A y L-24A).
3. En el tramo 3 se invirtió el sentido de excavación, de L-10 a L-13, para reducir los riesgos que la presión de agua en L-13 imponía al arranque. La ASF anota que la Conagua no documentó los motivos de ese cambio en el expediente que justificaba pagos conexos.

Dato técnico: una fuente de 2010 define el tramo 5 de L-21 a L-17 y el 6 del portal a L-21; las posteriores usan L-20. Es consistente con el cambio de trazo de 2011, que modificó el tramo 6 y creó L-21A, L-23A y L-24A (inferencia).

A diciembre de 2009, el avance físico era de 24.6 % y el financiero de 17.0 %. El inicio de la obra se fecha el 13 de agosto de 2008, tres meses antes de la firma del contrato, lo que apunta a trabajos previos; la ASF lo ubica a finales de 2008. A cinco años de arrancar

solo 34 % del túnel estaba excavado y la Conagua replanteó su estrategia.

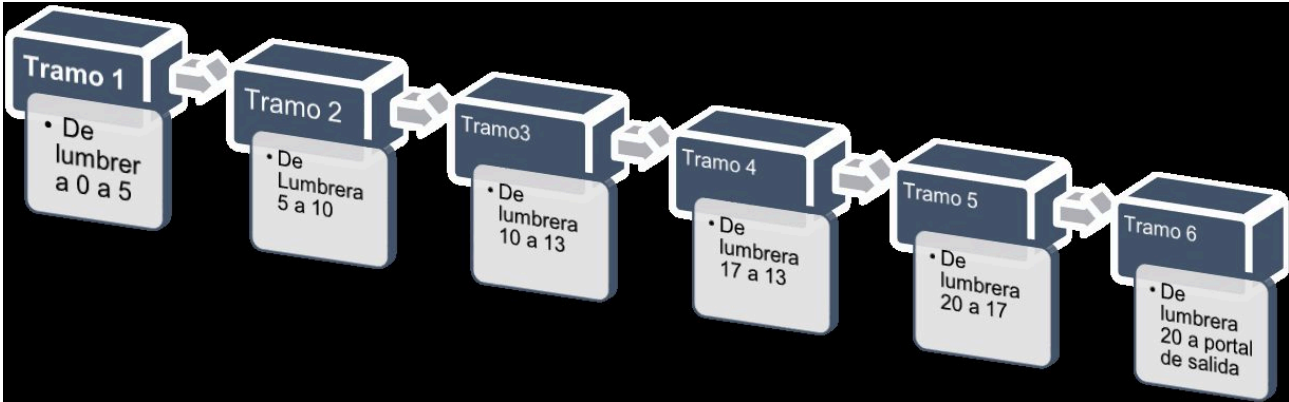


Figura 20.3. Los seis tramos del TEO con las lumberras que los limitan

SUPERVISIÓN Y ASESORÍAS

El contrato 08-011 es de servicios relacionados con la obra, a precios unitarios y tiempo determinado, también por adjudicación directa. Cubre la supervisión técnica y administrativa y el control de calidad del proyecto ejecutivo y de la construcción. Se celebró el 11 de diciembre de 2008 con Dirac, S.A. de C.V., en participación conjunta con Lumberras y Túneles, S.A. de C.V. y Consultoría Integral en Ingeniería, S.A. de C.V..

TABLA 20.7. CONTRATO DE SUPERVISIÓN 08-011

INSTRUMENTO	FECHA	INCREMENTO (MILES DE PESOS)	PLAZO AGREGADO (D.N.)	MONTO ACUMULADO (MILES DE PESOS)	PLAZO ACUMULADO (D.N.)
Contrato original	11/12/2008	651,401.5	1,461	651,401.5	1,461
2do modificadorio	30/09/2011	382,091.0	751	1,033,492.5	2,212
3er modificadorio	15/11/2012	108,754.0	196	1,142,246.5	2,408
1er adicional	21/08/2015	556,744.8	1,203	1,698,991.3	3,611
2do y 3er adicionales (solo plazo)	21/12/2018 y 22/02/2019	sin cambio	62 y 243	1,698,991.3	3,916
4to y 7mo adicionales	28/08/2019 y 2019	18,696.1 y 20,476.8	68 y 122	1,738,164.2	4,106
8vo adicional (reducción)	01/10/2020	-9.1	191	1,738,155.1	4,297

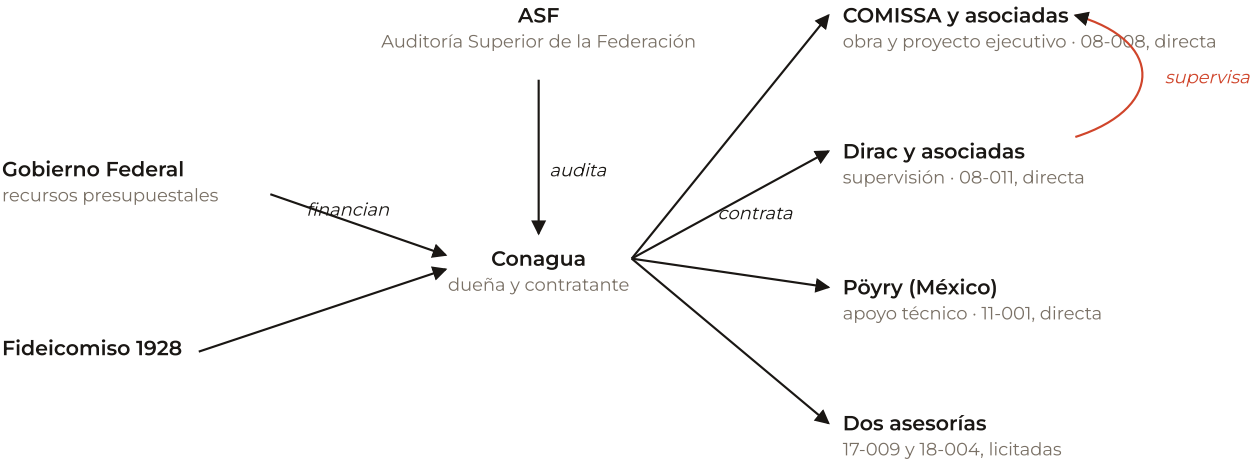
El primer modificatorio (27/01/2010) no cambió monto ni plazo. La ASF numera los adicionales del cuarto al séptimo sin incluir un quinto ni un sexto. Al corte de abril de 2022 el contrato está finiquitado con 1,737,881.8 miles ejercidos. La supervisión creció 2.67 veces en monto y 2.94 en plazo, y equivale a 8.4 % del monto final de la obra (1,738,155.1 / 20,702,812.5; cálculo propio).

La ASF de 2012 dimensiona el ritmo de gasto: al 31 de diciembre de 2012 se habían ejercido 7,066,986.5 miles de pesos en la obra y 672,316.0 en la supervisión. A poco más de cuatro años del contrato la obra había ejercido 51 % del monto entonces vigente (7,066,986.5 / 13,947,705.2) y 34 % de lo que finalmente costó (7,066,986.5 / 20,702,812.5).

La ASF de 2018 revisó además tres contratos de apoyo. El de Pöyry (México), de apoyo técnico, jurídico, administrativo y financiero (28/11/2011, adjudicación directa), pasó de 155,579.9 a 382,260.8 miles de pesos y de 1,130 a 2,573 d.n. con cinco convenios. Las dos asesorías técnico-administrativas, 17-009 (31/03/2017, Corporativo en Competencia de Personal, 84,717.8 miles finales) y 18-004 (20/02/2018, LORE Soluciones Integrales Empresariales de Sinaloa y Firmeza Jurídica, 79,586.7 miles), fueron licitaciones públicas nacionales. Lo que se licitó fue el soporte administrativo; lo que se adjudicó sin licitación fue el proyecto, la construcción, la supervisión y el apoyo de Pöyry.

Quién contrató, vigiló, auditó y pagó

contratos del TEO revisados por la ASF



Elaboración propia con datos de ASF 2018-1727 (p. 4), ASF 2021-0082 (p. 4) y Vargas (2010, p. 44).

Figura 20.4. Quién contrató, supervisó, auditó y financió el TEO

COSTO TOTAL Y SU COMPOSICIÓN

La ASF consigna el costo total estimado en 46,263,917.6 miles de pesos, a octubre de 2019, cuando la obra tenía 99.9 % de avance físico, 62,101.0 m excavados y 41,352 anillos de dovelas colocados.

TABLA 20.8. CONTRATOS DOCUMENTADOS FRENTE AL COSTO TOTAL ESTIMADO

CONCEPTO	MONTO (MILES DE PESOS)	PORCENTAJE DE 46,263,917.6
Obra 08-008 (monto final)	20,702,812.5	44.7 %
Supervisión 08-011 (monto final)	1,738,155.1	3.8 %
Pöyry 11-001	382,260.8	0.8 %
Asesorías 17-009 y 18-004	164,304.5	0.4 %
Suma de contratos documentados	22,987,532.9	49.7 %
Resto, sin desglose por contrato	23,276,384.7	50.3 %

La mitad del costo estimado queda fuera de los contratos detallados. El Libro Blanco da el presupuesto autorizado por año (sección 16.2) y no por concepto; los indicios de lo que contiene esa mitad son los siguientes. Por la urgencia, el dueño compró las seis tuneladoras y las entregó al contratista: en febrero de 2008, nueve meses antes del contrato de obra, se encargaron a Herrenknecht tres escudos EPB, y la S-497 es

"propiedad de la CONAGUA". También hay terrenos y derechos de vía y las obras de puesta en operación del tramo 1, con la planta El Caracol, medias cañas, losas tapa, chimeneas y bardas.

En 2021 se pagaron 94,363.5 miles por gastos financieros, 521,549.7 por ajuste de porcentajes de indirectos y financiamiento y 59,836.7 por ajustes de costos. De los 702,129.7 miles ejercidos en la obra ese año, solo 26,379.8 (3.8 %) fueron trabajos de obra: el finiquito incluyó componentes que no son ejecución física.

46,263.9 MDP es el costo del proyecto, no el monto del contrato de obra. Compararlo con los 9,595.6 MDP originales, 4.8 veces, mezcla alcances. La comparación a igualdad de alcance es la de la tabla 20.5: de 9,595.6 a 20,702.8 MDP, 2.16 veces.

TABLA 20.9. GASTO EJERCIDO POR CONTRATO Y AÑO

PERIODO	OBRA 08-008 (MILES DE PESOS)	SUPERVISIÓN 08-011 (MILES DE PESOS)
Hasta el 31 dic 2012 (acumulado)	7,066,986.5	672,316.0
2012 (solo el año)	2,213,306.9	235,543.9
2008 a 2017 (acumulado)	16,229,722.0	1,452,392.4
2018	2,229,595.9	141,493.6
Pendiente de pago a octubre de 2019	1,708,631.9	105,105.3
2021	702,129.7	30,517.3
Total ejercido a abril de 2022	20,636,599.1	1,737,881.8

De 2008 a 2017 se ejercieron 16.2 mil millones de pesos en la obra, unos 1.6 mil millones por ejercicio en promedio. En 2012 y en 2018 el ejercicio fue de 2.2 mil millones: seis años después de la fecha original de terminación, la obra seguía gastando al mismo ritmo. Es la expresión financiera del retraso.

EL FIDEICOMISO 1928 Y EL MANDATO DEL TEO

La Conagua celebró el contrato del Mandato del TEO el 16 de junio de 2009, con autorización de la SHCP, para acopiar y ejercer los recursos de la obra; lo opera Banjército. Entre junio de 2009 y junio de 2018 recibió 27,137.3 MDP, de los cuales

20,583.3 eran de la Conagua y 6,554.0 del Fideicomiso 1928, y pagó 24,857.8 MDP a las empresas contratadas. El fideicomiso financió así cerca de una cuarta parte de lo depositado (24.2 %, cálculo propio).

Dentro del esquema del Fideicomiso 1928 existió un Mandato del TEO, acto jurídico sin estructura orgánica registrado con la clave 200916B0001512. En el tercer informe trimestral de la SHCP de 2021 se reportaron 886,305.1 miles de pesos ejercidos con cargo al mandato; el cuarto informe y la Cuenta Pública 2021 ya no lo reportaron. La Conagua explicó que el Convenio de Terminación es del 28 de septiembre de 2021, que sus remanentes, 3,468.2 miles, se concentraron en la cuenta de Banobras FID 1928, que el mandato concluyó operaciones el 30 de septiembre de 2021 y que el oficio 511/2530 del 27 de noviembre de 2021 notificó la baja de la clave.

La ASF consideró que la observación subsiste porque el convenio de terminación no reportó el monto ejercido, y emitió la Promoción de Responsabilidad Administrativa Sancionatoria 2021-9-16B00-22-0082-08-001. El hallazgo no es de sobreprecio, sino de transparencia: los 886.3 MDP no se reflejan en el cierre.

RESULTADOS DE LAS AUDITORÍAS DE LA ASF

Cuenta Pública 2012. La ASF revisó los 2,448,850.9 miles de pesos de 2012, 100 % del universo, repartidos entre la obra (2,213,306.9 miles) y la supervisión (235,543.9 miles). Concluyó que el monto coincide con los controles internos, que se aplicaron las deducciones y los anticipos se amortizaron bien, que los materiales cumplieron las especificaciones y que los trabajos siguieron los programas. Hubo tres observaciones, todas solventadas, y dictamen limpio.

TABLA 20.10. HALLAZGOS DE LA AUDITORÍA DE 2012

HALLAZGO	MONTO OBSERVADO (MILES DE PESOS)	QUÉ SE ENCONTRÓ	CIERRE
Acero de refuerzo, concepto PU-104	795.0	Se estimaron y pagaron volúmenes mayores a los ejecutados	Deductiva de 948.0 miles en la estimación 162

HALLAZGO	MONTO OBSERVADO (MILES DE PESOS)	QUÉ SE ENCONTRÓ	CIERRE
Acero de refuerzo, concepto 104	5,145.2	El precio incluía un oficial soldador y soldadura que no eran necesarios	Deductiva de 10,744.4 miles en la estimación 188
Anillos de dovelas, PUE-078 (f'c = 550 kg/cm ²)	37,468.0	Sobreestimación de 374 anillos entre los km 30+793.443 y 40+631.757: se fabricaron y pagaron 6,933 y se requerían 6,559	Deductiva de 900,734.9 miles en la misma estimación 188
Total observado	43,408.2	Tres observaciones	Recuperaciones operadas: 43,561.2 miles (dato ASF)

Los 374 anillos de 1.5 m equivalen a 561 m, y el importe da unos 100.2 miles de pesos por anillo (37,468.0 / 374). La deductiva de la estimación 188 supera con mucho lo observado, lo que indica que esa estimación incluyó otros ajustes que la fuente no detalla.

Cuenta Pública 2018. La ASF revisó cinco contratos por 2,504,068.4 miles de pesos, con una muestra de 359 conceptos y 24 partidas por 1,475,869.9 miles (58.9 %). Concluyó que la Conagua cumplió en términos generales, excepto en dos aspectos: ingenierías complementarias pagadas como precios extraordinarios cuando ya estaban en el precio alzado, y pagos injustificados por 87,931.7 miles en dos contratos de asesoría de personal. Monto por aclarar: 91,040,842.59 pesos.

TABLA 20.11. HALLAZGOS DE LA AUDITORÍA DE 2018

CONTRATO	HALLAZGO	OBSERVADO (MILES DE PESOS)	JUSTIFICADO (MILES DE PESOS)	PERSISTE (PESOS)
Obra 08-008	Ingeniería complementaria como precios extraordinarios (cimentaciones de plantas, grúa pórtico, bandas, ventilación, torres de enfriamiento, patios, cuna de TBM en L-14 a L-17, planos de L-21A) cuando ya estaba en el precio alzado	8,774.6	6,082.0	2,692,670.47
Obra 08-008	Ingeniería complementaria de caminos y terracerías por tramo	1,164.1	747.6	416,484.93

CONTRATO	HALLAZGO	OBSERVADO (MILES DE PESOS)	JUSTIFICADO (MILES DE PESOS)	PERSISTE (PESOS)
Asesoría 17-009	187 personas en promedio, de diciembre de 2017 a febrero de 2018, con actividades duplicadas	17,481.3 más IVA	0	17,481,310.34
Asesoría 18-004	178 personas en promedio, de febrero a diciembre de 2018	70,450.3 más IVA	0	70,450,376.85
Todos	39 estimaciones revisadas (17 de obra y 22 de servicios): anticipo amortizado 8,236.6 miles, retenciones de la SFP 12,167.0 miles, IVA 359,864.3 miles	n. a.	n. a.	sin irregularidad
Total por aclarar				91,040,842.59

La Conagua logró justificar parte de la ingeniería. La ASF aceptó el cambio de la planta de concreto por una de mayor capacidad, porque los vecinos impidieron instalar una planta móvil por las vibraciones y el tráfico pesado, y la logística para suministrar el concreto del revestimiento de L-6 desde L-7; la ingeniería del cambio de trazo del tramo 6 (302.8 miles) y 5,601.2 miles del sistema electromecánico de bandas para retirar la rezaga de L-14 a L-17; y, en caminos, la reconstrucción de la avenida Gran Canal, el acceso a L-04 y el puente sobre la autopista México-Pachuca que obligó a cambiar el acceso a L-7. No aceptó la ingeniería de ventilación, la cimentación de la grúa pórtico, la cuna de recepción de la tuneladora y la planta de inyección de bentonita-cemento (2,692.6 miles), porque el procedimiento constructivo del propio contratista ya indicaba esos equipos; ni los cambios de sentido de excavación del tramo 3, de señalización del tramo 4 y del camino a L-20 (416.5 miles), por falta de causas documentadas.

Aquí está el problema de fondo del contrato mixto. Cuando una ingeniería está dentro del precio alzado, el contratista asume el riesgo; cuando se reconoce como concepto extraordinario, paga el dueño. La frontera la marcan los términos de referencia y el procedimiento constructivo del contratista. Estos pliegos son pequeños frente al contrato, 3.1 millones de pesos contra 20,167.9 millones (0.015 %), pero muestran una tensión recurrente.

Los pliegos de asesoría, 87.9 millones y 96.6 % del monto por aclarar, son de otra naturaleza: no es riesgo geológico, sino gestión. La ASF encontró que 187 y 178 personas, contratadas por outsourcing con sueldos mensuales brutos de 8,908.53 a 119,670.45 pesos, hacían actividades administrativas generales que duplicaban las de la Coordinación General y las de la supervisión y el apoyo. La Conagua respondió que la Ley Federal del Trabajo no le aplica y que había dictámenes de falta de personal; la ASF los consideró insuficientes porque no iban acompañados de la autorización escrita del titular.

Cuenta Pública 2021. La ASF revisó los 732,647.0 miles de pesos del mandato ejercidos en 2021 (de 886,305.1 reportados), con 142 conceptos por 722,960.3 miles (98.7 %), en obra y supervisión. Es una auditoría con finiquito. Concluyó que la Conagua cumplió en términos generales, excepto cinco aspectos que generaron cuatro pliegos de observaciones y una promoción de responsabilidad administrativa; monto por aclarar: 120,698,991.63 pesos.

TABLA 20.12. HALLAZGOS DE LA AUDITORÍA DE 2021

HALLAZGO	MONTO (MILES DE PESOS)	ESTATUS
Gastos financieros por 94,363.5 miles en la estimación de finiquito 444; diferencia por plazo de pago de 10 días naturales frente a 20 de la ley	40,091.9	Atendido: 10 días es menor que 20 y, por tanto, legal; sin acción
EXT-1390, trabajos a la tuneladora HK S-497 tras la inundación de febrero de 2010, sin documentar turnos de mano de obra ni horas de maquinaria; los reportes de las dos empresas de servicios difieren	8,858.4	Subsiste: pliego por 8,858,449.48 pesos
EXT-1564 y EXT-1565, ingeniería complementaria de los tramos II (L-7 a L-9) y V (L-19 a L-17), ya incluida en el precio alzado	320.9	Subsiste: pliego por 320,924.03 pesos
EXT-1520, traslado de componentes de la S-497 de L-13 a L-5, sin cotizaciones; las facturas correspondían a un traslado de L-20 a L-5	1,306.6	Subsiste: pliego por 1,306,560.80 pesos
Cuarto convenio adicional: aumento sin justificar de indirectos en 2.G Renta de casas y 7.A Medio ambiente, seguridad e higiene	110,213.1	Subsiste: pliego por 110,213,057.32 pesos

HALLAZGO	MONTO (MILES DE PESOS)	ESTATUS
Mandato del TEO: 886,305.1 miles ejercidos que no aparecen en el cierre ni en la Cuenta Pública	no es daño	Subsiste: promoción de responsabilidad sancionatoria
Retenciones de la SFP e IVA de las estimaciones 442 (obra) y 274 (supervisión)	n. a.	Sin irregularidad
Total por aclarar		120,698,991.63 pesos

El hallazgo mayor son los costos indirectos del cuarto convenio: 91.3 % del monto por aclarar de 2021 (110,213.1 / 120,699.0). Los importes de campo pasaron de 43,815.5 a 145,654.0 miles en renta de casas (razón de 3.32, diferencia de 101,838.5) y de 4,376.6 a 12,751.2 miles en medio ambiente, seguridad e higiene (razón de 2.91, diferencia de 8,374.6). La ASF habla de "incrementos" de 332.43 % y 291.35 %, pero esas cifras son la razón entre convenio y contrato; el aumento porcentual estricto es de 232.43 % y 191.35 %.

La Conagua alegó irretroactividad: debía aplicarse el reglamento de 2001, vigente al firmar el contrato en 2008, que no exigía autorización para revisar indirectos. La ASF contestó que el artículo séptimo transitorio del reglamento de 2010 se refiere a los contratos y no a los convenios, que se celebraron en 2019 con el reglamento nuevo, y su Dirección General Jurídica confirmó la observación. Es el único hallazgo de la serie que discute qué norma rige un convenio posterior a un reglamento nuevo.

En el finiquito hay otra tensión que la ASF no concilia. El contrato fijó pagar las estimaciones en 10 días naturales, menos que los 20 de la ley, y la Conagua explicó que el contrato tenía un costo de financiamiento de 0.000 %; sin embargo, el finiquito pagó 94,363.5 miles por gastos financieros y 521,549.7 por ajuste de indirectos y financiamiento.

Esta concentración es lo más relevante de 2021. Que 91 % de lo observado sea un solo concepto, renta de casas y medio ambiente, seguridad e higiene, sin relación de gastos, no indica un fraude, sino que los indirectos de un convenio se aprobaron por razón y no por

soporte. Los indirectos son lo primero que se estira cuando el plazo crece y lo último que se documenta.

TABLA 20.13. LAS TRES AUDITORÍAS.

ASPECTO	CUENTA PÚBLICA 2012	CUENTA PÚBLICA 2018	CUENTA PÚBLICA 2021
Universo (miles de pesos)	2,448,850.8	2,504,068.4	732,647.0
Cobertura de la muestra	100 %	58.9 %	98.7 %
Monto por aclarar	0 (todo solventado)	91,040,842.59 pesos	120,698,991.63 pesos
Acciones	Ninguna; dictamen limpio	4 pliegos	4 pliegos y 1 PRAS
Falla dominante	Cantidades pagadas y precios mal integrados (acero, dovelas)	Ingeniería complementaria dentro del precio alzado; asesoría duplicada	Indirectos de convenio sin soporte; conceptos extraordinarios; reporte del fideicomiso

Tres auditorías, un hallazgo cada una

millones de pesos observados o por aclarar; misma escala en las tres

2012 · ASF 2012-0312

anillos de dovela pagados de más

fabricados y pagados 6,933

requeridos 6,559

374 anillos de más

monto 37.5

solventado; dictamen limpio

2018 · ASF 2018-1727

ingeniería extra y asesorías duplicadas

Ingeniería complementaria pagada como trabajo extraordinario.

Asesoría: 187 y 178 personas con actividades duplicadas.

monto 91.0

por aclarar

2021 · ASF 2021-0082

indirectos del 4to convenio

Costos indirectos del 4to convenio: 110.2 de los 120.7 por aclarar.

91.3 %

monto 120.7

por aclarar

Por aclarar en 2018 y 2021: 211.7 millones, 1.0 % del contrato de obra y 0.46 % del costo total estimado (cálculo propio).

Elaboración propia con datos de ASF 2012-0312 (pp. 3-5), ASF 2018-1727 (pp. 5-24) y ASF 2021-0082 (pp. 15-22).

Figura 20.5. Tres auditorías de la ASF al TEO y su hallazgo principal

La suma de los montos por aclarar es 211,739,834.22 pesos (91,040,842.59 + 120,698,991.63), unos 211.7 MDP. Equivale a 1.0 % del contrato de obra y a 0.46 % del costo total.

BALANCE DE LA GESTIÓN DE COSTOS

Por qué subió el contrato. Las causas que mencionan las fuentes técnicas son cinco. Primero, información geotécnica insuficiente al arrancar: el informe de línea base no estuvo terminado hasta 2010 y la geología real se revisó varias veces; las máquinas se fabricaron en un año a partir de una ingeniería básica con 14 sondeos, mientras un segundo estudio geotécnico arrojaba diferencias. Segundo, los cambios de trazo y de lumbreras (L-3A, L-21A, L-23A y L-24A) y de sentido de excavación. Tercero, eventos de obra no previstos: la inundación de 2010, la alta presión de agua al excavar la lumbrera 10, la pérdida del cabezal de la rozadora en la lumbrera 19 y la oposición vecinal. Cuarto, un reparto de riesgos poco claro: se tardó al menos tres meses en autorizar un precio para la primera intervención hiperbárica en México, versión de un proveedor que los pliegos EXT-1390 y EXT-1520 hacen verosímil. Quinto, tramos repartidos por distancia, de unos 10 km, y no por geología, con un trazo que pudo ser más profundo para evitar el terreno mixto (punto 3).

Los datos documentados permiten tres conclusiones.

1. Las auditorías no encontraron pagos por trabajos no ejecutados de gran magnitud: los montos por aclarar suman 211.7 MDP. En ese sentido, el control del gasto por estimación fue razonable.
2. El desvío importante está en el monto y el plazo del contrato, 2.16 y 2.79 veces. Los tres primeros convenios concentran 95.2 % del incremento de monto y los de 2019, el 4.8 % restante.
3. La estructura de supervisión y asesoría fue cara y en parte redundante. Supervisión (1,738.2 MDP), Pöyry (382.3) y dos asesorías (84.7 y 79.6) suman 2,284.7 MDP, 11.0 % del monto final de la obra, y la ASF cuestionó 87.9 MDP de las asesorías por duplicidad.

Sobre la adjudicación directa, el balance a favor es el tiempo, la experiencia del consorcio y el riesgo de falla del Emisor Central. En contra, se firmó un contrato que mezclaba proyecto y obra con un proyecto ejecutivo que se desarrolló a la par de la construcción, con una cláusula que preveía renegociar cada vez que el terreno difiriera de lo supuesto, y el monto se multiplicó por 2.16. No es posible determinar si una licitación habría salido más barata; sí se observa que en la práctica el riesgo geológico recayó en el dueño.

02

Seguridad y riesgos

Este capítulo separa tres niveles: el riesgo del sistema que justificó el proyecto, los riesgos geotécnicos y constructivos de lumbreras y tuneladoras, y los riesgos laborales, que dos fuentes evalúan con matrices.

Las fuentes públicas no traen cifras de accidentes, lesionados ni fallecidos de la obra: ni los informes de la ASF, ni el comunicado de la Conagua, ni los artículos y tesis consultados. Por eso las dos matrices de riesgos evalúan riesgos potenciales y no accidentes ocurridos. El único dato oficial de la fuerza laboral es el del comunicado de inauguración: más de 4 mil personas al mes, las 24 horas del día, con 142,226 toneladas de acero, 1.3 millones de metros cúbicos de concreto y 4.7 millones de metros cúbicos excavados (Conagua, comunicado 851-19, pp. 1-2). Las dos matrices son de un artículo académico y de una tesis, y no el análisis de riesgos oficial de la obra que exige la NOM-031-STPS-2011.

LA RAZÓN DEL PROYECTO: EL RIESGO DE FALLA DEL EMISOR CENTRAL

La Evaluación de Diseño del Programa K131 resume el problema: el Emisor Central había operado 19 años sin mantenimiento mayor y su capacidad se estimaba reducida de 170 a 110 m³/s, con la posibilidad de un colapso que obstruyera el flujo y provocara una inundación generalizada en el centro y el oriente de la Ciudad de México. Una

inspección de 2005 detectó averías en el revestimiento, con deterioro progresivo del concreto y del acero. El TEO protege además a unos 4 millones de habitantes en 217 km² inundables.

EVENTOS Y RIESGOS DURANTE LA OBRA

TABLA 20.14. RIESGOS Y EVENTOS DOCUMENTADOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

EVENTO O RIESGO	DÓNDE	QUÉ OCURRIÓ Y CÓMO SE ATENDIÓ
Lluvias atípicas de febrero de 2010	Tramo 1, L-0 a L-5	Inundación del túnel; la S-497 requirió rehabilitación y pruebas del 3 ago al 19 nov 2010. La tuneladora del tramo 5 apoyó al tramo 1 y se construyó L-3A
Atrapamiento de la S-519	Tramo 6	El trazo original cruzaba vulcanitas muy fracturadas; cambio de trazo en enero de 2011 con tres lumbreras nuevas
Presión de agua en L-13 al arranque	L-13 y L-10	Riesgo al arrancar la excavación del tramo 3; se invirtió el sentido, de L-10 a L-13
Agua a alta presión	L-10	Largos retrasos en la lumbrera y dificultad para iniciar la perforación
Falla de fondo por subpresión	L-12	FS de 0.11 frente a 1.3 admisible; 18 pozos de abatimiento
Extrusión del suelo al abrir el túnel	L-00	FS de 0.59 frente a 1.5 mínimo; franja de 3.67 m de lodo fraguante
Aportaciones elevadas de agua	Subtramo L-20 a L-19	Impidieron el revestimiento definitivo conforme al plan; hubo que sellar antes de colocar cimbra y se reubicaron las bandas en L-19
Pérdida del cabezal de la rozadora	Lumbrera 19	Pérdida de tiempo
Oposición vecinal a plantas y equipos	L-6 y L-7	Vecinos alegaron daños en viviendas por vibraciones y tráfico pesado; se cambió la logística de concreto

El riesgo dominante fue geotécnico e hidráulico: agua a presión en un terreno heterogéneo. El trazo presenta presiones de agua de 4 a 6 bar y arcillas lacustres intercaladas con basaltos de hasta 80 MPa; además, el trazo corre varios kilómetros a la orilla de un canal de aguas negras sin revestimiento y que en un tramo pasa a 10 m de una laguna.

RIESGOS GEOTÉCNICOS EN LUMBRERAS: L-00, L-12 Y L-20

L-00: extrusión del suelo al abrir la entrada del túnel. Para iniciar la excavación desde la L-00 (cadenamiento 0+000) hay que cortar una ventana circular de 8.70 m de diámetro en la pared de la lumbrera para posicionar el escudo EPB. En ese momento el suelo natural queda casi sin apoyo horizontal, sostenido solo por una pantalla de lodo fraguante con arena, y los empujes pueden extruirlo. Por eso se decidió mejorar el terreno frente a la ventana con reemplazo de suelo. Sin tratamiento el factor de seguridad por extrusión es de 0.59, menor que el mínimo recomendado de 1.5; con una franja de 3.67 m de espesor sube a 3.5. La mezcla es de 300 kg de cemento, 300 kg de arena, 67 kg de bentonita, 742 litros de agua y Fraguacil al 15 % del volumen de cemento, con resistencia mínima de 1,500 kPa a 28 días, complementada con tres líneas de inyección por consolidación vertical. Aunque el análisis muestra que el reemplazo basta, se propone además inyecciones de manguito desde la superficie para consolidar la pantalla perimetral, donde un sondeo encontró materiales blandos contaminados con mortero, y formar una barrera de suelo tratado junto a la franja.

L-12: falla de fondo por subpresión. Con la profundidad máxima de excavación $D_f = 84.5$ m, el estrato drenante (unidad K) a partir de 87.2 m, un peso volumétrico de 1.7 t/m^3 y una presión de agua del orden de 41 t/m^2 , sin bombeo, el factor de seguridad contra subpresión es

$$FS = \frac{(H - D_f) \gamma_m}{u} = \frac{(87.2 - 84.5)(1.7)}{41} = 0.112$$

donde H es la profundidad donde inicia el estrato drenante en m, D_f la profundidad de excavación en m, γ_m el peso volumétrico del suelo entre D_f y H en t/m^3 y u la presión del agua en t/m^2 . El mínimo admisible es 1.3. Un FS de 0.11 significa que, sin abatimiento, la presión supera con holgura el peso que la contiene y podría levantar el fondo.

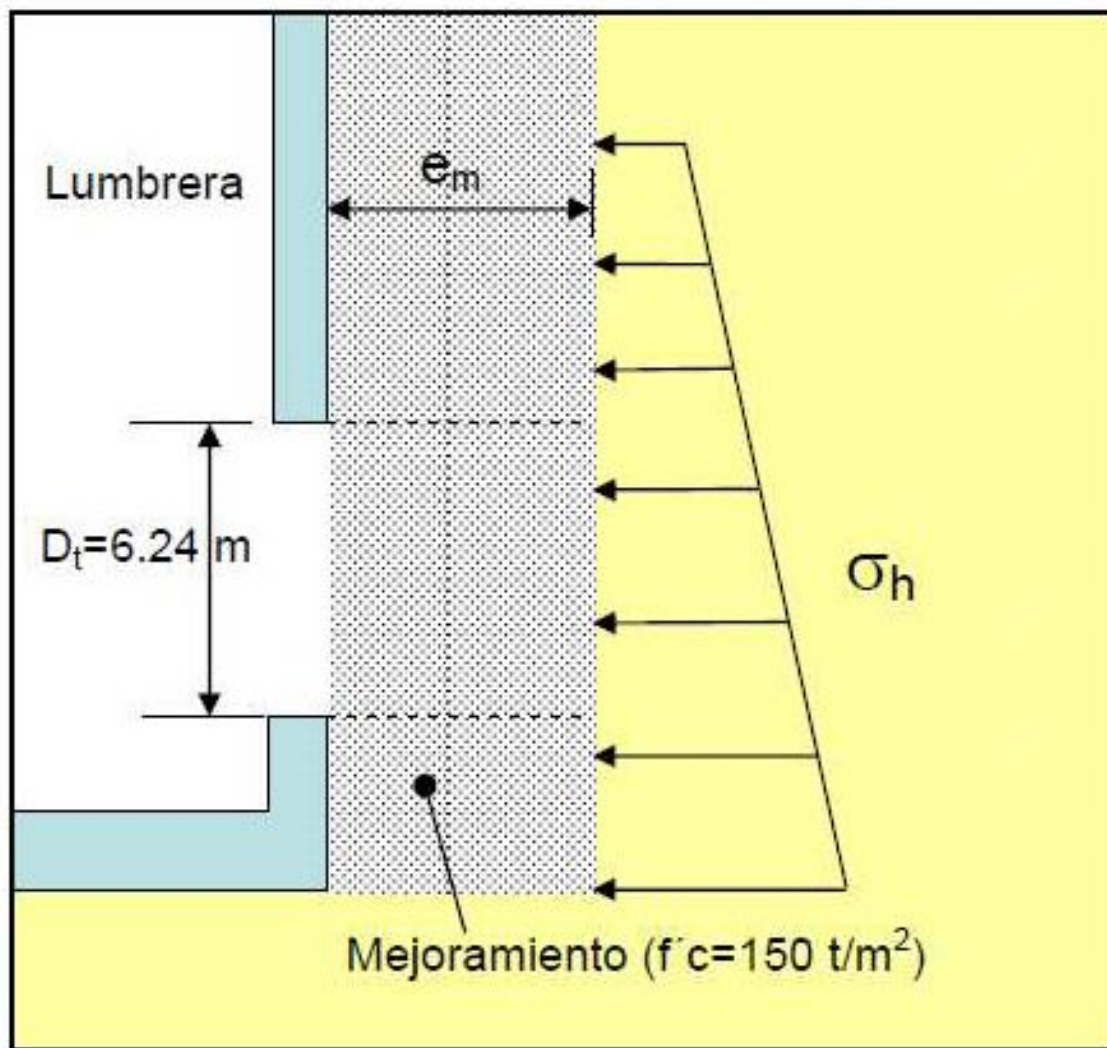


Figura 20.6. Análisis de espesor del mejoramiento en la conexión túnel-lumbrera de L-00

El caudal de bombeo estimado en el proyecto era de 4.6 l/s, con seis pozos de 0.77 l/s, y no analizó el estrato por debajo de 80 m, justo donde se presentó la subpresión. Los aforos reales superaron los 600 l/s (614.34 l/s más 12.22 l/s de achique) y la suma por pozo fue de 688 l/s antes de la interferencia hidráulica. El sistema final tuvo 18 pozos de abatimiento, ocho adicionales a los diez existentes, y funcionó del 21 de abril de 2010 al 10 de septiembre de 2012: 873 días. Lo real fue unas 130 veces lo estimado (600 / 4.6). La decisión fue abatir la presión con pozos y vigilarla con piezómetros, no cambiar la geometría de la lumbrera.

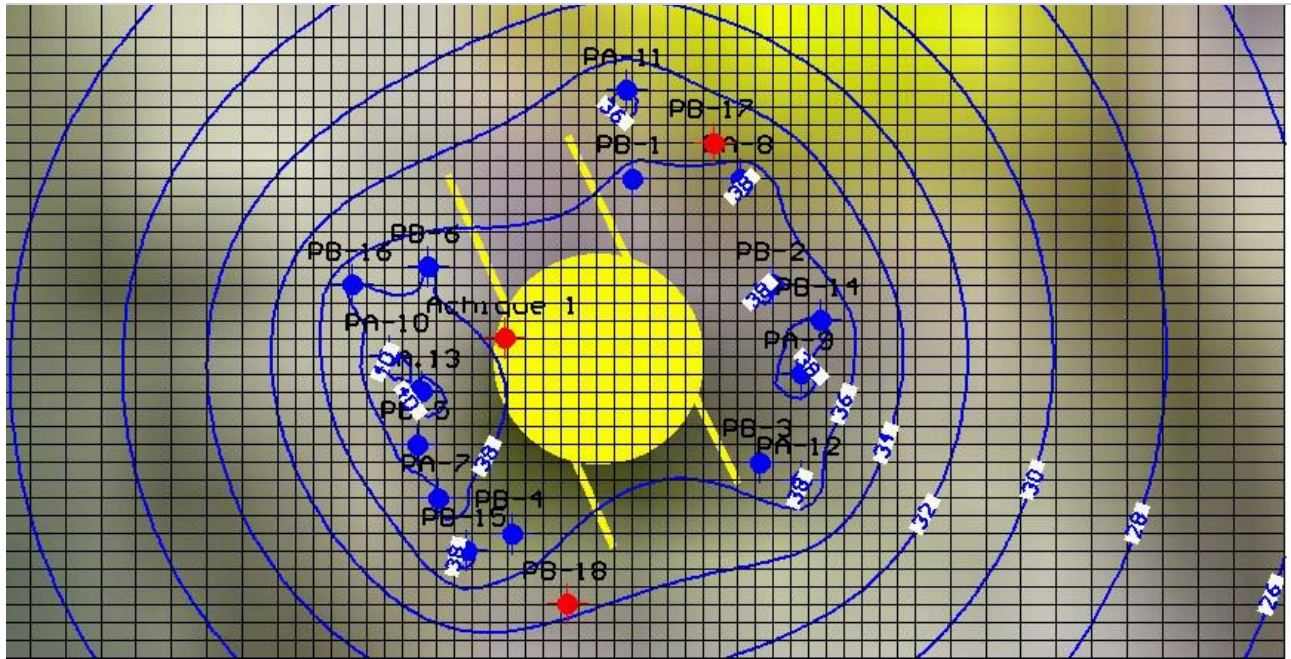


Figura 20.7. Pozos de abatimiento y niveles piezométricos alrededor de la lumbrera L-12

L-20: la lumbrera más profunda. La L-20, en Huehuetoca, cadenamiento 49+607.654, tiene profundidad máxima de 148.204 m en terreno de cota 2,269.385 msnm. Se construyó con muro Milán hasta 120 m, tableros de 1.20 m de ancho y 2.80 m de longitud, y de ahí hacia abajo con concreto lanzado, anclas y marcos de acero. Es la lumbrera de obra civil más profunda de México; el contratista usó una rozadora hidráulica para tableros "hasta 100 m", de modo que probablemente 100 m es la capacidad del equipo y 120 m la profundidad del muro (inferencia). La Conagua definió la instrumentación: cuatro inclinómetros verticales de 160 m y una estación piezométrica de cuatro piezómetros de cuerda vibrante (sec. 3). En las primeras lecturas, el inclinómetro IV-2 en el terreno mostró hasta 10 mm hacia la excavación en superficie, con un cambio de dirección a los 123 m (29 mm hacia afuera); el IV-4 registró 5 mm hasta 71.5 m, y el IV-3, en el muro, 3 mm atribuidos al asentamiento del ademe y a la precisión del instrumento.

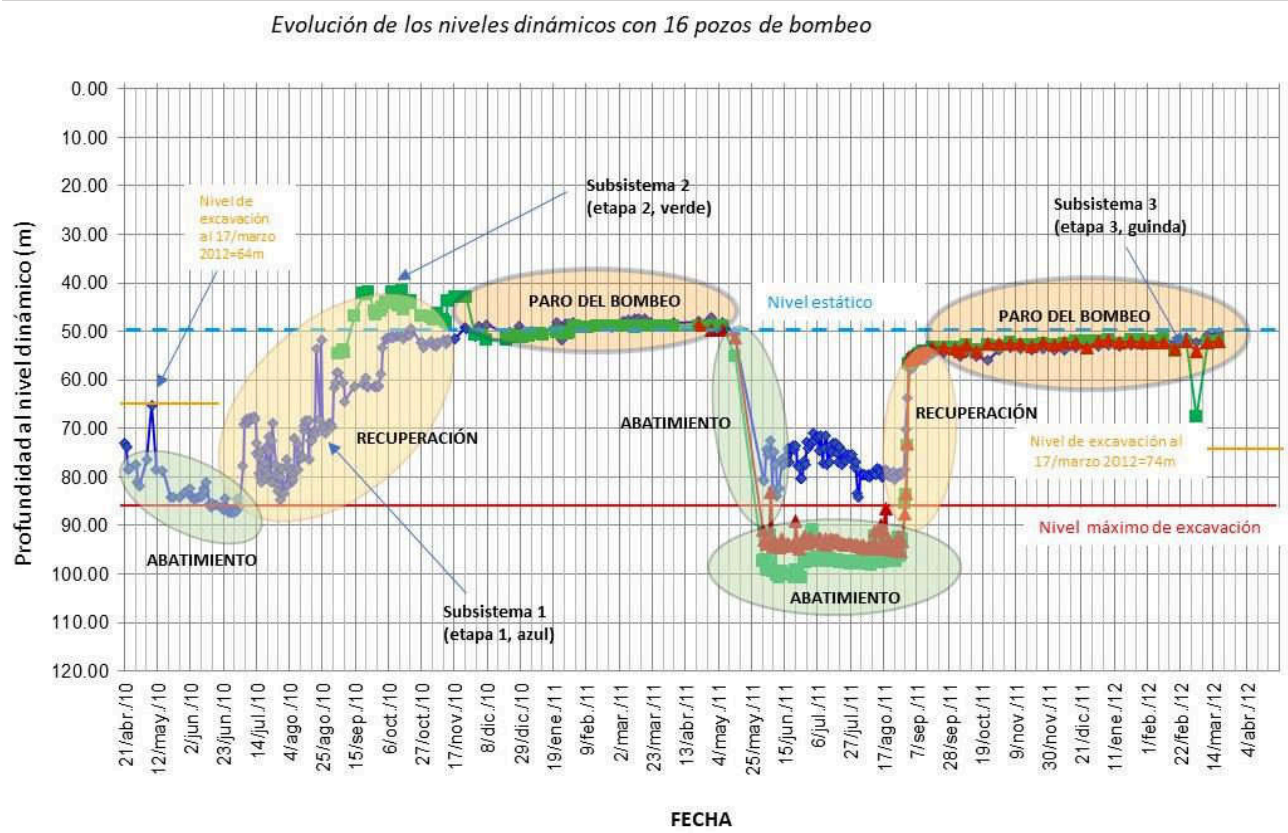


Figura 20.8. Evolución de los niveles dinámicos con 16 pozos de bombeo en L-12

TABLA 20.15. LOS TRES CASOS GEOTÉCNICOS

LUMBRERA	RIESGO	CIFRA CLAVE	MEDIDA
L-00	Extrusión del suelo al abrir la ventana de salida	FS 0.59 sin tratamiento; 3.5 con franja de 3.67 m (mínimo 1.5)	Reemplazo con lodo fraguante de f'c mínimo 1,500 kPa e inyecciones
L-12	Falla de fondo por subpresión	FS 0.11 (mínimo 1.3); 4.6 l/s estimados frente a más de 600 l/s reales	18 pozos de abatimiento durante 873 días
L-20	Estabilidad de una excavación de 148 m en suelos lacustres con agua	Desplazamientos horizontales de 3 a 29 mm en las primeras lecturas	Muro diafragma hasta 120 m; inclinómetros y piezómetros

RIESGOS DE LA EXCAVACIÓN MECANIZADA CON EPB

Operar escudos de presión de tierras en terreno mixto bajo presión de agua tiene riesgos propios. Las máquinas llevaron cabezales de disco de 17 pulgadas intercambiables, 25 puertos de inyección para aditivos y seis para espuma y un tornillo sin fin de dos etapas con cinta de 900 mm que transporta bloques de hasta 600 mm, previstos para basalto de hasta 80 MPa y presiones de 4 a 6 bar. Como las condiciones fueron más severas que las previstas en 2008, se modificaron con esclusa de personal para 7 bar con cámara de descompresión adicional, esclusa de materiales, mamparo rediseñado, placas de carburo de cromo en el tornillo sin fin, aire comprimido para controlar el agua en la cámara, barras grizzly en el cabezal y nuevos rascadores.

La primera intervención hiperbárica con EPB en México se hizo el 2 de junio de 2013 en el lote 4, tras 405 m de excavación, con hasta 3.5 bar. Después se hicieron unas 50 intervenciones hiperbáricas y el resto a presión atmosférica, a pesar del bombeo de hasta 180 l/s, porque eran más rápidas y baratas. En el lote 5, tras la lumbrera 19 el frente pasó de arcilla con arena limosa a basalto completo con flujo de 200 l/s, y los cambios de herramienta tomaron más de 20 días. Las cifras de rendimiento del lote 4 son 30 m en un día y 528 m en un mes. Una intervención hiperbárica expone a los trabajadores a presión y, por tanto, a la enfermedad de descompresión; la matriz de la sección 17.6 la evalúa.

MATRIZ DE RIESGOS LABORALES EN LA CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS

Jiménez et al. (2016, pp. 391-392) siguen el apartado 5.3 de la NOM-031-STPS-2011, que exige análisis de riesgos por actividad. Califican una probabilidad con cuatro índices (personas expuestas, procedimientos existentes, capacitación y exposición) y una severidad de tres niveles; el producto se compara con una escala de cinco grados: 4 trivial, 5 a 8 tolerable, 9 a 16 moderado, 17 a 24 importante y 25 a 36 intolerable.

TABLA 20.16. ANÁLISIS DE RIESGOS POR ACTIVIDAD DE CONSTRUCCIÓN DE LUMBRERAS

ACTIVIDAD	RIESGO	PROB.	SEV.	PUNTAJE	GRADO
Brocales	Armado de acero y colado: golpes, cortes, espalda	6	2	12	Moderado
Muros Milán	Excavación hasta 40 m con maquinaria: atropellamiento, caídas	10	2	20	Importante
Muros Milán	Armado y colocación de acero: quemaduras, cortes	10	2	20	Importante

ACTIVIDAD	RIESGO	PROB.	SEV.	PUNTAJE	GRADO
Excavación del núcleo	Maquinaria en el piso: aplastamiento, ahogamiento por derrumbe o inundación	6	3	18	Importante
Revestimiento primario	Lanzado de concreto: quemaduras, intoxicaciones	7	2	14	Moderado
Nivelación topográfica	Trabajos en altura: caídas	8	3	24	Importante (por la escala)
Losa de fondo	Bajada de acero al fondo: aplastamiento	10	3	30	Intolerable
Losa de fondo	Colado con tubería a alta presión	9	3	27	Intolerable
Revestimiento definitivo	Armado de acero a gran altura: caídas	10	3	30	Intolerable
Revestimiento definitivo	Montaje y retiro de la plataforma de la cimbra deslizante	8	3	24	Importante

Dato técnico: en la última fila el artículo imprime 32 e Intolerable, pero 8 por 3 es 24, que corresponde a Importante; se corrige el puntaje y el grado. Los demás grados intolerables se concentran en actividades de carga y altura.

Los riesgos intolerables se concentran en el trabajo con cargas y a gran altura dentro de la lumbrera: bajada del acero, colado con tubería a presión, armado de las parrillas del revestimiento definitivo y montaje de la plataforma. Los autores recomiendan no autorizar esos trabajos hasta demostrar con evidencias que hay procedimientos, análisis de riesgos detallado, plan de evacuación, revisión de la grúa y certificación del operador. También documentan, aun estando prohibido, personal descendiendo en canastillas improvisadas por la premura y la tolerancia de los encargados, pláticas de seguridad de cinco minutos, responsables de seguridad con formación de bombero o paramédico y un tiempo casi siempre ajustado que llevaba a directores de proyecto a justificar actos arriesgados. El artículo reconoce que la seguridad "ha mejorado mucho", pero falta mucho por hacer.

El artículo se recibió en abril de 2015, con la obra en curso, y describe 52 km de túnel y 7.5 m de diámetro final, cifras que difieren de las oficiales (62.4 km y 7.0 m). Por eso se usa solo para el método y las observaciones cualitativas.

MATRIZ IPER DE LA TUNELADORA HK-S 498

Los riesgos de operación de la tuneladora HK-S 498 en el tramo 2 se evalúan con una matriz IPER de 5 por 5, con cinco niveles de severidad, de menor a catastrófico, y cinco de frecuencia, de común a prácticamente imposible. Cada celda es un valor numérico del nivel de riesgo; un valor bajo es un riesgo alto. Los valores de 16 o más se declaran tolerables sin medida correctiva, y los de 15 o menos reciben medidas.

TABLA 20.17. RIESGOS CON MEDIDA CORRECTIVA EN LA MATRIZ IPER DE LA HK-S 498

PROCESO	PELIGRO Y RIESGO	SEVERIDAD Y FRECUENCIA	PUNTAJE	MEDIDA CORRECTIVA
Alimentación de dovelas	Transporte de dovelas con grúa: aplastamiento	Catastrófico, podría suceder	4	Mantenimiento de la grúa; radio entre operador y montaje; código de señales; levantar la carga 10 a 15 cm y verificar equilibrio
Prolongación de vías	Tensión eléctrica: choque	Catastrófico, raro que suceda	7	Procedimiento de revisión de componentes eléctricos
Avance	Líquidos derramados: resbalamiento	Temporal, común	10	Botas antiderrapantes; banda antiderrapante; señalar contenedores
Cable de energía	Prolongación del cable de alta tensión	Catastrófico, prácticamente imposible	11	Procedimiento de revisión eléctrica
Construcción de anillo	Erector en giro: aplastamiento o amputación	Mortalidad, raro que suceda	12	Zonas de alto riesgo; radiofrecuencia entre operador y montaje; mantenimiento y prueba de carga del erector
Cámara de excavación	Rueda de corte y ventanas de acceso: caída a distinto nivel	Permanente, podría suceder	13	Prohibido entrar delante de la rueda de corte; ventanas cerradas en servicio
Construcción de anillo	Peldaños, barandas y plataformas: caída	Temporal, ha sucedido	14	Revisión de instalaciones y arneses; metodología 5S
Prolongación de vías	Iluminación insuficiente y desorden: tropiezo	Menor, común	15	Revisión de instalaciones; 5S

La intervención hiperbárica y el desprendimiento del frente en la cámara se evalúan en 21 (tolerable), con el control de seguir el procedimiento e informar al médico de turno al primer síntoma de enfermedad de descompresión. El resultado es que la mayoría de los resultados es tolerable, que los amarillos y rojos exigen mejoras y que el protocolo debe integrar normas nacionales e internacionales.



Figura 20.9. Panel de radiocontrol de la grúa de dovelas

Normas de seguridad que citan las fuentes. Su vigencia se verificó en el Catálogo Mexicano de Normas (PLATIICA) el 10 de octubre de 2026.



Figura 20.10. Trabajos en las vías de la locomotora del tren de apoyo

TABLA 20.18. NORMAS DE SEGURIDAD LABORAL CITADAS Y SU VIGENCIA

NORMA	TEMA	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA	APLICACIÓN
NOM-031-STPS-2011	Construcción: condiciones de seguridad y salud	DOF 04-05-2011; en vigor desde el 04-11-2011; vigente	Análisis de riesgos por actividad, apartado 5.3; trabajos en altura, apartado 14; prohibición de permanecer bajo cargas suspendidas, 17.4.5 inciso m
NOM-033-STPS-2015	Trabajos en espacios confinados	DOF 31-08-2015; en vigor desde el 30-11-2015; vigente	Lumbreras y trabajos dentro del túnel

NORMA	TEMA	PUBLICACIÓN Y VIGENCIA	APLICACIÓN
NOM-018-STPS-2015	Sistema armonizado de identificación y comunicación de peligros por sustancias químicas	DOF 09-10-2015; en vigor desde el 09-10-2018; vigente	Sustancias químicas en la operación de la tuneladora
NOM-001-STPS-2008	Edificios, locales e instalaciones	DOF 24-11-2008; en vigor desde el 23-01-2009; vigente	Escaleras y herramientas
NOM-017-STPS-2008	Equipo de protección personal	DOF 09-12-2008; sustituida por la NOM-017-STPS-2024, publicada en 2025	El proyecto PROY-NOM-017-STPS-2017 citado en la literatura no llegó a publicarse como norma

BALANCE DE LA GESTIÓN DE RIESGOS

Los datos muestran cuatro aciertos. El riesgo geotécnico más grave de cada lumbrera estudiada se identificó con cálculo (FS de 0.59 y 0.11) y se trató con medidas cuantificadas: franja de lodo fraguante, 18 pozos, muro diafragma a 120 m, inclinómetros y piezómetros. Se cambió el trazo en vez de seguir en roca muy fracturada con riesgo de atrapamiento. Las máquinas se modificaron cuando la geología resultó más severa. Y la L-20 se instrumentó desde el inicio.

También muestran deficiencias. La información geotécnica inicial fue insuficiente, y L-12, con 4.6 l/s estimados frente a más de 600 reales, es la evidencia más clara. Faltaba experiencia local y norma para ciertas operaciones: la primera intervención hiperbárica con EPB en México fue en 2013. Y en la seguridad laboral de las lumbreras se documentan canastillas improvisadas, capacitación mínima y responsables sin formación en procedimientos constructivos.

Sin cifras de accidentes ni bitácoras de seguridad no es posible juzgar la seguridad de la obra por sus resultados. Lo que se desprende de la evidencia es que el riesgo geotécnico se controló con ingeniería razonable y que el riesgo laboral de las actividades de carga y altura es alto. En una lumbrera, el peligro mayor proviene menos de lo calculado que de

lo improvisado por la prisa, y las fuentes describen esa prisa, desde los plazos ajustados hasta las canastillas. El calendario, que se alargó casi tres veces, no debió comprarse con seguridad en los primeros años.

03

Cronología

Este capítulo ordena en el tiempo los hitos documentados entre 2005 y 2022. Las fuentes de cada hito figuran en las referencias del capítulo y en los apartados anteriores.

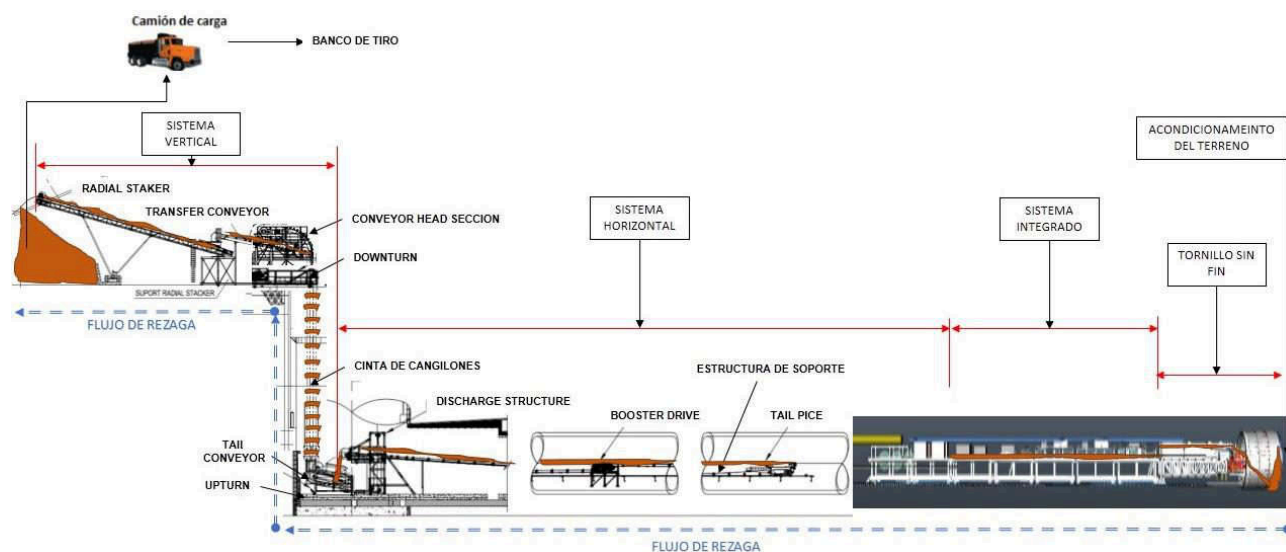


Figura 20.11. Frente de excavación del tramo 3 del TEO

DE LA EMERGENCIA A LA ÚLTIMA EXCAVACIÓN

TABLA 20.19. CRONOLOGÍA DEL TEO, 2005-2019.

FECHA	HITO
2005	Inspección del Emisor Central que detecta averías en el revestimiento
2007	El presidente califica la inundación como "emergencia nacional" y la coloca como prioridad del Programa Nacional de Infraestructura
Nov 2007	Nace el proyecto del TEO, con meta de 150 m ³ /s y salida alterna al Emisor Central

FECHA	HITO
Feb 2008	Se encargan a Herrenknecht tres escudos EPB (S-497, S-498, S-519)
Mar 2008	Estudio de la MIA-P; anteproyecto de 12,780 MDP de obra y servicios
18 jun 2008	Resolutivo condicionado de la MIA; ver capítulo 18
13 ago 2008	Inicio de las obras según una tesis
14 nov 2008	Contrato de obra 08-008 (adjudicación directa; 9,595,580.5 miles; 1,402 d.n.)
11 dic 2008	Contrato de supervisión 08-011 (651,401.5 miles; 1,461 d.n.)
Dic 2009	Avance físico de 24.6 % y financiero de 17.0 %
3-4 feb 2010	Lluvias atípicas inundan el túnel del tramo 1; daño a la S-497
21 abr 2010	Comienza el bombeo de abatimiento en L-12
2010	Se concluye el informe de línea base geotécnica
Ene 2011	Cambio de trazo del tramo 6
5 jul 2011	1er convenio modificadorio de obra: +4,207,935.9 miles; +762 d.n.
Feb 2012	La tuneladora del lote 3 (Carso) inicia su avance
9 ago 2012	2do convenio modificadorio de obra: +144,288.8 miles; +230 d.n.
Ago 2012	Arranca la tuneladora del lote 4 desde la lumbrera 17
1 oct y 19 dic 2012	Terminan la excavación el subtramo 1B (L-5 a L-3A) y el 1A (L-0 a L-3A) del tramo 1
10 sep 2012	Termina el sistema de abatimiento de L-12 (873 días)
15 sep 2012	Fecha de terminación pactada en el contrato original
2 jun 2013	Primera intervención hiperbárica con EPB en México (lote 4)
Jun 2013	Se inaugura el tramo 1, 10 km de L-0 a L-5, con la planta El Caracol
Sep 2013	Informe final de la Evaluación de Diseño del Programa K131
Oct a nov 2013	Deductivas de 10,744.4 y 900,734.9 miles (estimación 188); se solventan las observaciones de la ASF de 2012
Ago 2014	Arranca la tuneladora del lote 5 desde la lumbrera 20; en octubre queda ensamblada en el túnel
1 ago 2015	1er convenio adicional de obra: +6,220,144.6 miles; +1,184 d.n.
31 mar 2017	Asesoría administrativa 17-009 (licitación pública nacional)
2018	Termina la excavación del tramo 3

FECHA	HITO
20 feb 2018	Asesoría administrativa 18-004 (licitación pública nacional)
26 oct 2018	2do convenio adicional de obra: solo plazo, +122 d.n.
22 feb 2019	3er convenio adicional de obra: +196,184.2 miles; +145 d.n.
28 feb 2019	La tuneladora del tramo 5 (ICA) rompe en la lumbrera de 150 m, tras 6 km
23 may 2019	La última de las seis EPB termina de excavar: tramo 4 (Carso), 10.2 km de L-17 a L-13; 62.1 km en diez años
19 jul 2019	4to convenio adicional de obra: +338,678.5 miles; +66 d.n.
Oct 2019	Avance físico de 99.9 %; 62,101 m excavados y 41,352 anillos de dovelas
4 dic 2019	Termina la construcción de los 62.4 km
23 dic 2019	Entran en funcionamiento los 52.3 km restantes y se inaugura el TEO en Huehuetoca

Dato técnico: tres fechas de arranque conviven: 13 de agosto de 2008, 14 de noviembre de 2008 (el contrato, según la ASF) y finales de 2008. Son compatibles si la primera se entiende como trabajos previos a la firma. La ASF toma como arranque el contrato.

DURACIONES

Contadas desde la firma del contrato de obra, el 14 de noviembre de 2008, con ambos días incluidos:

TABLA 20.20. DURACIONES DESDE LA FIRMA DEL CONTRATO DE OBRA. CÁLCULO.

INTERVALO	DÍAS	AÑOS
Plazo contractual original	1,402	3.8
Plazo contractual final	3,911	10.7
Hasta la última excavación (23/05/2019)	3,843	10.5
Hasta el fin de la construcción de los 62.4 km (04/12/2019)	4,038	11.1
Hasta la inauguración (23/12/2019)	4,057	11.1
Hasta la inauguración del tramo 1	unos 1,673	4.6

El tramo 1, de 10.1 km y 16 % de la longitud (10.1 / 62.4), entró en operación a los 4.6 años de la firma, después de la fecha originalmente pactada para terminar toda la obra. Y la construcción física terminó 127 días después del último periodo contractual (4,038 – 3,911). La ASF fija el término de la construcción el 4 de diciembre de 2019, posterior al 30 de julio de 2019; es probable que esos meses correspondan al revestimiento final, las obras complementarias o las pruebas (inferencia).

EL CIERRE CONTRACTUAL Y FISCAL, 2020 A 2022

TABLA 20.21. HITOS POSTERIORES A LA INAUGURACIÓN.

FECHA	HITO
20 ene 2020	Dictamen de la ASF de la Cuenta Pública 2018
23 mar 2020	Fin del periodo de ejecución de la estimación 442, final de obra
15 sep 2020	Fin del plazo del 8° convenio adicional de supervisión
4 mar 2021	Pago de la estimación 442 (obra)
15 abr 2021	Pago de la estimación 444 de finiquito (gastos financieros por 94,363.5 miles)
28 y 30 sep 2021	Convenio de terminación del Mandato y fin de sus operaciones
27 nov 2021	Oficio 511/2530 de baja de la clave 200916B0001512
Abr 2022	Contratos de obra y supervisión finiquitados
14 jun 2022	Dictamen de la ASF de la Cuenta Pública 2021

En resumen: el contrato de obra se multiplicó en monto y plazo por los cambios del proyecto y del terreno, no por pagos indebidos, y las auditorías de la ASF dejaron montos por aclarar pequeños frente al total. La adjudicación directa ganó tiempo a costa de iniciar sin proyecto ejecutivo terminado. En seguridad, el riesgo geotécnico se atendió con ingeniería y el laboral en lumbreras sigue siendo el punto débil. La cronología muestra una obra pactada para cuatro años que se terminó en once.



Parte II · La línea de conducción del TEO

21

Contexto social y político

Tres gobiernos, una obra y dos valles

El Túnel Emisor Oriente lo decidió Calderón, lo creó Peña Nieto y lo inauguró López Obrador. Entre la decisión y la inauguración pasaron once años, el plazo del contrato de obra se multiplicó por 2.79 y su monto, por más de dos (capítulo 20). El túnel protege a los municipios hundidos del oriente del Valle de México y entrega el agua al Valle del Mezquital, donde esa agua es desde hace un siglo un recurso y un problema.

Este capítulo no trata la ingeniería de detalle. Reúne el contexto político y social que explica varias decisiones técnicas: la adjudicación directa por urgencia, el arranque sin proyecto ejecutivo, los cambios de trazo y los convenios que alargaron la obra de 1,402 a 3,911 días. Los antecedentes de las obras de desagüe están en el capítulo 3; la historia técnica del anteproyecto y de la construcción, en los capítulos 13 y 14; los contratos, los costos y las auditorías, en el capítulo 20.

El capítulo se ordena por gobierno federal: qué decidió cada uno, qué hizo bien y qué hizo mal según la evidencia. Después describe el contexto social de las dos regiones que conecta el túnel. La evidencia procede de cuatro niveles, que se distinguen en el texto: auditorías de la ASF, documentos oficiales de Conagua, tesis y artículos académicos, y prensa, marcada como [Prensa].

01

El punto de partida: una cuenca cerrada que se hunde

La Cuenca del Valle de México no tiene salida natural. Todo su drenaje sale por obras artificiales: el Tajo de Nochistongo, el Gran Canal del Desagüe, el Emisor del Poniente y el Emisor Central del Drenaje Profundo (Conagua, s/f). La sobreexplotación de los acuíferos hunde la ciudad, los hundimientos quitan pendiente a las obras superficiales y el Gran Canal, diseñado con 19 cm por km, terminó por "regresar" el agua en lugar de sacarla, de modo que hubo que bombear en un canal pensado para funcionar por gravedad.

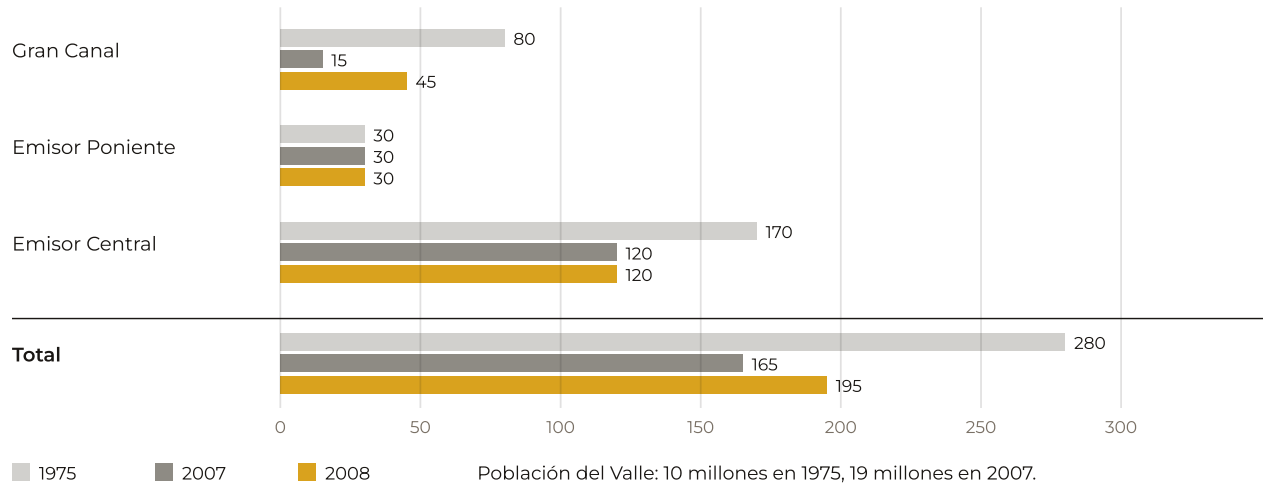
El dato que más pesa en la justificación del proyecto es que la capacidad de desalojo cayó a poco más de la mitad mientras la población casi se duplicaba. La capacidad requerida, 315 m³/s, frente a los 195 m³/s disponibles en 2008, dejaba un déficit de 120 m³/s.

Tabla P.1. Capacidad de desalojo de las salidas de la Zona Metropolitana del Valle de México (m³/s).

OBRA	1975	2007	2008
Gran Canal del Desagüe	80	15	45
Emisor Poniente	30	30	30
Emisor Central	170	120	120
Total	280	165	195
Habitantes (millones)	10	19	n. a.

Capacidad de desalojo del Valle de México

m³/s por obra en 1975, 2007 y 2008



El aumento de 2008 viene de plantas de bombeo emergentes, no de pendiente recuperada.

Elaboración propia con datos de Conagua (s/f), lámina "Capacidad de desalojo de las obras de la ZMVM".

Figura 21.1. Capacidad de desalojo del Valle de México, 1975, 2007 y 2008

Entre 1975 y 2007 la capacidad total bajó 115 m³/s. En proporción, la caída fue de

$$\Delta\% = \frac{C_{1975} - C_{2007}}{C_{1975}} \times 100 = \frac{280 - 165}{280} \times 100 = 41.1\%$$

donde C_{1975} y C_{2007} son las capacidades totales de desalojo en m³/s y $\Delta\%$ es la pérdida porcentual. El aumento de 2008 en el Gran Canal, de 15 a 45 m³/s, vino de cuatro plantas de bombeo emergentes construidas en la segunda mitad de 2007.

El Emisor Central, inaugurado en 1975, era la salida principal y no se podía vaciar para inspeccionarlo, porque ninguna otra ruta tomaba su caudal. La ASF lo plantea desde su primera auditoría: el TEO opera de manera alterna con el Túnel Emisor Central en estiaje, para dar mantenimiento a ambas estructuras y "mitigar el riesgo de falla que en la actualidad prevalece sobre el Túnel Emisor Central". Las últimas acciones de conservación databan de 1990. La justificación oficial no es solo más capacidad, sino redundancia: dos túneles para poder parar uno.

En abril de 2012, el director de Sacmex explicó que desde 2009 se dejaba en seco el Drenaje Profundo en estiaje para repararlo, que hubo que construir 155 compuertas para aislarlo y que una inspección con lancha a control remoto encontró 47 km con daños mayores por arrastre de arenas y gases [Prensa].

Dato técnico: el riesgo de falla del Emisor Central se cuantificó con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que entregó a Conagua las manchas de inundación que causaría una falla, de donde salieron los daños evitables del análisis costo-beneficio. El escenario es una obstrucción que inundaría más de 217 km² del centro y el oriente de la ciudad. Los valores de probabilidad de falla no se publicaron, por lo que se habla de riesgo y no de probabilidad.

02

Calderón (2006-2012): decisión, contrato y arranque

QUÉ DECIDIÓ

El gobierno de Calderón anunció en noviembre de 2007 el Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México, del que el TEO es la obra mayor. El 24 de marzo de 2008 anunció en la presa Endhó la construcción del túnel y de la PTAR Atotonilco, con el compromiso de terminarlo en cuatro años. La presentación del

programa descartaba quedarse en medidas menores: el mantenimiento del Emisor Central, las plantas de bombeo y la rectificación de cauces "no cubren la capacidad necesaria" y su operación estaba limitada "a no más de ocho años" (Conagua, s/f).

En el anteproyecto el TEO aparece con 62 km, 7 m de diámetro, 24 lumbreras, 150 m³/s, profundidades de 25 a 150 m y un perfil geológico en seis tramos (Conagua, s/f). La versión construida terminó con 25 lumbreras y 62.4 km por los cambios de trazo del tramo 6. El análisis completo del anteproyecto está en el capítulo 13.

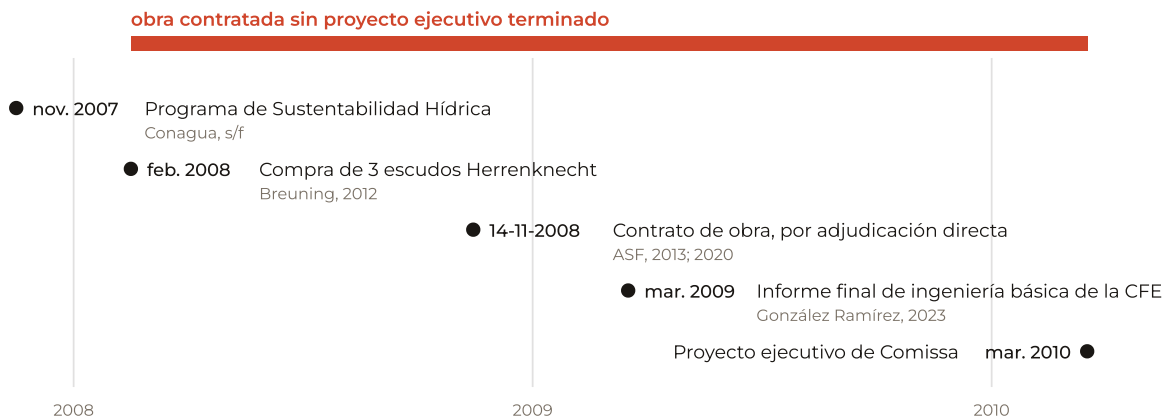
El estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental se elaboró conforme al artículo 21 de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas, con las manchas de inundación del Instituto de Ingeniería de la UNAM: una falla del Emisor Central alcanzaba nueve delegaciones del Distrito Federal y cuatro municipios del Estado de México, con daños a viviendas, al aeropuerto, al Metro y a subestaciones eléctricas. El resultado fue una tasa interna de retorno de 26.6 %, con tasa social de descuento de 12 %, y 2008 como momento óptimo de inversión para que el túnel operara desde 2013. Un dictamen favorable de un tercero lo respaldó. El análisis se registró en la cartera de inversión de la SHCP en mayo de 2008 con un presupuesto hipotético, determinado "con base a la disponibilidad presupuestaria".

La Semarnat autorizó la MIA de manera condicionada el 18 de junio de 2008, 28 días después de ingresada (capítulo 18). En septiembre de 2008 Conagua acordó contratar el proyecto ejecutivo y la construcción por adjudicación directa, con dos criterios de la ley: que "peligre o se altere el orden social, la economía, los servicios públicos, la salubridad, la seguridad o el ambiente de alguna zona o región del país" y que existan circunstancias que puedan provocar pérdidas o costos adicionales importantes. El contrato de obra se firmó el 14 de noviembre de 2008 con un consorcio encabezado por Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea (Comissa), con participación de Ingenieros Civiles Asociados, Carso Infraestructura y Construcción, Construcciones y Trituraciones, Constructora Estrella y Lombardo Construcciones. Era un contrato mixto: el proyecto ejecutivo a precio alzado y la construcción a precios unitarios. La supervisión, también

por adjudicación directa, se firmó el 11 de diciembre de 2008. La compra de tres tuneladoras EPB se adjudicó el 17 de diciembre de 2008, aunque Conagua las había contratado a Herrenknecht desde febrero de ese año.

Máquinas y contrato antes que estudios

noviembre de 2007 a marzo de 2010



Elaboración propia con las fuentes de cada hito; la lectura de la secuencia es inferencia del equipo.

Figura 21.2. Obra contratada antes de terminar el proyecto ejecutivo, 2007-2010

La ingeniería básica la hizo la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de la CFE por convenio con Conagua, con informe final de marzo de 2009. Comissa concluyó el proyecto ejecutivo el 30 de marzo de 2010.

Durante el sexenio se firmaron dos convenios al contrato de obra, en julio de 2011 y agosto de 2012, por la modificación del método constructivo del tramo 1, la lumbrera adicional L-3A y el cambio de trazo del tramo 6, autorizado en enero de 2011 para evitar que la tuneladora S-519 quedara atrapada en "vulcanitas muy fracturadas". El detalle de montos y plazos está en el capítulo 20.

QUÉ HIZO BIEN

1. Reconoció el riesgo de falla del Emisor Central, lo cuantificó con apoyo de la UNAM y construyó una salida alterna en lugar de limitarse a obras de emergencia de vida corta.
2. Aseguró el arranque con rapidez. La adjudicación directa se apoyó en una justificación que la Conagua acreditó ante la ASF, y acortó el inicio de los trabajos frente a una licitación.

3. Corrigió el trazo del tramo 6 por riesgo de atrapamiento de una tuneladora, decisión técnica que exigió tres lumbreras nuevas.
4. Las primeras auditorías no encontraron irregularidades mayores: la de la cuenta pública 2008 no tuvo observaciones sobre el monto y la de 2012 terminó con dictamen limpio, con tres pagos corregidos por deductivas.

QUÉ HIZO MAL

1. Contrató y compró máquinas antes de tener proyecto ejecutivo. La ingeniería básica terminó en marzo de 2009 y el proyecto ejecutivo en marzo de 2010, con la obra ya contratada y las tuneladoras encargadas. Esa superposición explica la mayoría de los convenios posteriores.
2. Autorizó la obra con un presupuesto hipotético, no con un presupuesto real. La ASF lo calificó después como una de sus críticas más duras.
3. Fijó un plazo irreal. Los primeros 10 km se ofrecieron para mayo de 2012 y el Sacmex advirtió en abril que no abrirían sino hasta 2013 [Prensa]; a fin de 2012 el propio titular de Conagua informó que la obra se alargaría siete años, hasta 2019 [Prensa].
4. Se apoyó en una geología insuficientemente conocida. En 2017 el director de Conagua lo dijo sin rodeos: "Originalmente este contrato no tenía un proyecto", y la cláusula cuarta del contrato admite que "no es posible determinar con precisión los alcances y cantidades de los trabajos".

03

Peña Nieto (2012-2018): continuación, recálculo y retraso

QUÉ DECIDIÓ

El nuevo gobierno no canceló la obra: la continuó y reconoció en público que costaría más. El 13 de junio de 2013, en Ecatepec, al poner en operación los primeros 10 km, Peña Nieto instruyó a Conagua hacer estudios técnicos y financieros para recalcular el costo total, y el titular de Conagua, David Korenfeld, dijo que la obra llevaba 35 % de

avance y que harían falta obras complementarias, como la rectificación del río Tula y la estructura de descarga en el río El Salto [Prensa]. La ASF confirma que en 2013 entraron en operación los primeros 10.1 km, de L-0 a L-5, con la planta de bombeo El Caracol.

El discurso oficial comparó los 62 km del TEO con los 50 km del Eurotúnel y advirtió que mitigaría las inundaciones del oriente sin "eliminarlas"; el jefe de Gobierno, Miguel Ángel Mancera, lo llamó "una válvula de seguridad" [Prensa].

El presupuesto de la obra se actualizó en 2014 con un registro base global asociado a 16 contratos. En 2015 se firmó el primer convenio adicional, el de mayor monto y plazo del contrato (1,184 días), y en 2018 el segundo, solo de plazo. La supervisión y el apoyo técnico (Pöyry) también tuvieron convenios, y en 2017 y 2018 Conagua contrató por licitación pública nacional dos asesorías técnico-administrativas.

El 27 de julio de 2017 Roberto Ramírez de la Parra, quien había asumido Conagua tras la renuncia de Korenfeld en abril de 2015, recorrió el túnel desde la L-21A con periodistas. Informó que la excavación llevaba 78 %, con cinco máquinas operando; que una tuneladora quedó atrapada a unos 100 m de profundidad desde enero de 2017 y se liberó a mano, con cincel y martillo, en seis meses; que el catálogo de conceptos pasó de unos 160 al firmarse el contrato a unos 1,600; y que los sondeos "resultaron insuficientes para definir el tipo de suelo". Previó terminar de excavar en marzo o abril de 2018 y concluir en agosto de ese año.

En 2017 también empezó la rectificación del río Tula por la descarga del TEO. Se talaron 1,500 árboles de las orillas sin información previa a los pobladores, y de ahí nació la Red de Conciencia Ambiental Queremos Vivir; las autoridades aceptaron rediseñar el proyecto, pero el rediseño no ocurrió. La PTAR Atotonilco inició operación el 1 de diciembre de 2017.

QUÉ HIZO BIEN

1. Mantuvo la obra pese a que el costo se recalculó al alza, lo que evitó dejarla a medias, como ocurrió con otras obras.
2. Puso en operación en 2013 el primer tramo, 10.1 km, con una planta de bombeo; entró en servicio un tramo de la obra mientras se excavaba el resto.

3. Reconoció públicamente los límites del túnel: mitiga las inundaciones, no las elimina.
4. Licitó públicamente las asesorías administrativas de 2017 y 2018, en lugar de adjudicarlas de manera directa.

QUÉ HIZO MAL

1. El retraso se acumuló. La auditoría de la cuenta pública 2015, la más severa que recibió la obra, encontró 1,094 precios unitarios fuera del catálogo original, gastos por el cambio de trazo, el acondicionamiento de una tuneladora a un precio parecido al de una nueva y un concepto de excavación en suelos mixtos y roca que el catálogo original no tenía. A octubre de 2016 el TEO llevaba más de cuatro años de retraso frente a su análisis costo-beneficio. La ASF promovió una responsabilidad administrativa sancionatoria.
2. Por no terminar la obra a tiempo, el TEO no contribuyó a desalojar las inundaciones de 2013 a 2016, entre ellas la del 17 de agosto de 2014, cuando Miguel Hidalgo y Naucalpan fueron declarados en desastre por inundación de aguas negras. Conagua respondió que esas lluvias reflejan la insuficiencia del sistema, que el TEO no puede resolver solo.
3. Las dos asesorías de 2017 y 2018, aunque licitadas, tuvieron 187 y 178 personas con actividades que duplicaban las de la supervisión, las de Pöyry y las del personal de Conagua, según la ASF.
4. Las fechas anunciadas no se cumplieron. En marzo de 2018 un diputado de Morena presentó un punto de acuerdo para exhortar a Conagua a difundir el avance de una obra cuya conclusión estaba prevista desde 2012 y "ahora está comprometida" para 2018. La obra terminó el sexenio sin concluirse.
5. El proyecto del río Tula se ejecutó sin consulta previa a los pobladores y generó un conflicto que no se resolvió.

López Obrador (2018-2024): conclusión, inauguración y auditorías

QUÉ DECIDIÓ

El gobierno mantuvo los contratos vigentes y terminó la obra. Blanca Jiménez Cisneros, titular de Conagua, presentó la conclusión como parte del objetivo de terminar las obras recibidas en proceso. Los únicos movimientos contractuales fueron el convenio de supervisión de diciembre de 2018 y, en 2019, los convenios adicionales tercero y cuarto del contrato de obra, que llevaron el plazo a 3,911 días.

La excavación terminó el 23 de mayo de 2019 con seis tuneladoras y 62.1 km. El 4 de mayo de 2019 una visita de la Coordinación Nacional de Protección Civil y Conagua ya daba un avance físico de 96.1 %. A octubre de 2019 la ASF registró 99.9 % de avance. El contratista avisó la terminación el 30 de noviembre de 2019; el 4 de diciembre se finalizó la construcción de los 62.4 km y las 25 lumbreras, el 23 y 24 de diciembre se levantaron las actas de verificación y el 8 de enero de 2020 se firmó la entrega-recepción física total.

La inauguración fue el 23 de diciembre de 2019 en las lumbreras 19 y 20, en Huehuetoca. López Obrador dijo que la obra "representa la continuidad y al mismo tiempo el cambio" y la ligó con la alternancia democrática. Jiménez Cisneros afirmó que el revestimiento usa tecnología desarrollada por la UNAM, apta para conducir agua residual con bajo desgaste y con una duración de más de cien años, y dio las cifras físicas de la obra: 142,226 t de acero, 1.3 millones de m³ de concreto, 4.7 millones de m³ excavados y más de 4,000 personas al mes. Claudia Sheinbaum señaló que faltaban obras complementarias, ya en proceso, para aprovechar el potencial del túnel; Alfredo del Mazo dijo que las aguas negras se reutilizarían en la agricultura y Omar Fayad habló de coordinación metropolitana.

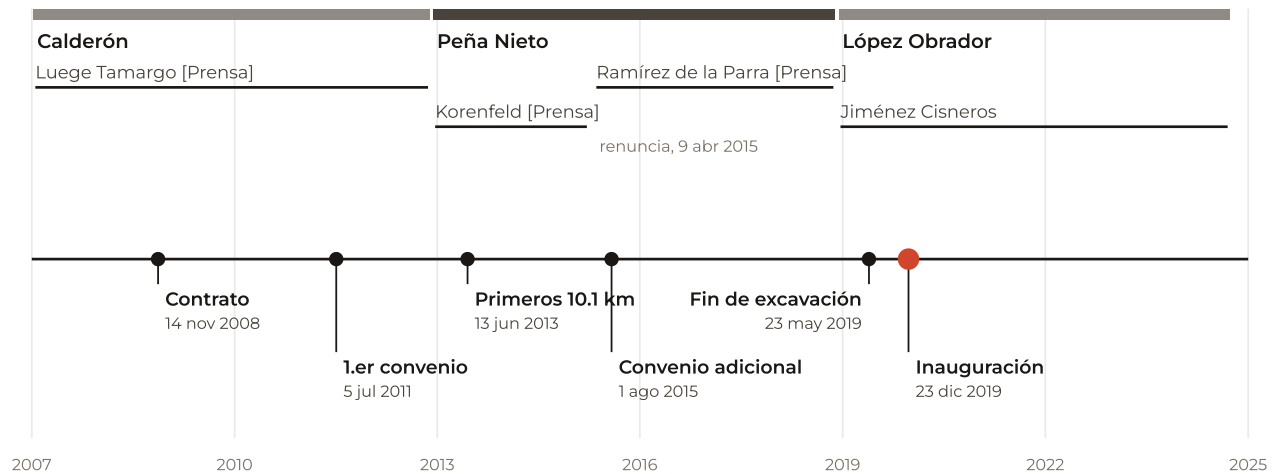


Figura 21.3. Titulares de Conagua y hitos del TEO por sexenio, 2007-2024

QUÉ HIZO BIEN

1. Concluyó una obra heredada en proceso, con un plazo de excavación cumplido en 2019 y entrega física formal en enero de 2020.
2. Operó con los seis equipos de excavación hasta el cierre, sin cambiar la estrategia constructiva.
3. Reconoció en la inauguración que el túnel requiere obras complementarias para rendir su potencial.
4. Las auditorías de las cuentas públicas 2018 y 2019 concluyeron con cumplimiento general, con observaciones puntuales.

QUÉ HIZO MAL

1. Cerró la obra con costos indirectos sin justificar. La auditoría de la cuenta pública 2021 observó el aumento de indirectos del cuarto convenio, y el Mandato del TEO no reportó el monto ejercido en su convenio de terminación.
2. No aplicó penas convencionales ni retenciones por el retraso de la terminación: la fecha pactada era el 30 de julio de 2019 y el aviso llegó el 30 de noviembre.
3. Persistió el pago de asesorías con actividades duplicadas y de trabajos que la ASF consideró ya incluidos en el precio alzado.
4. Dejó sin resolver la discusión sobre la PTAR. En mayo de 2022 un diputado pidió en la Comisión Permanente que Conagua hiciera pública la información sobre su operación y que la Profepa analizara sus lodos contra la NOM-004-SEMARNAT, por

denuncias de olores y vectores. Y el 6 de septiembre de 2021 el desbordamiento del río Tula dejó 16 muertos.

COMPARACIÓN DE LOS TRES GOBIERNOS

Tabla P.2. Qué aportó o cambió cada gobierno en el TEO.

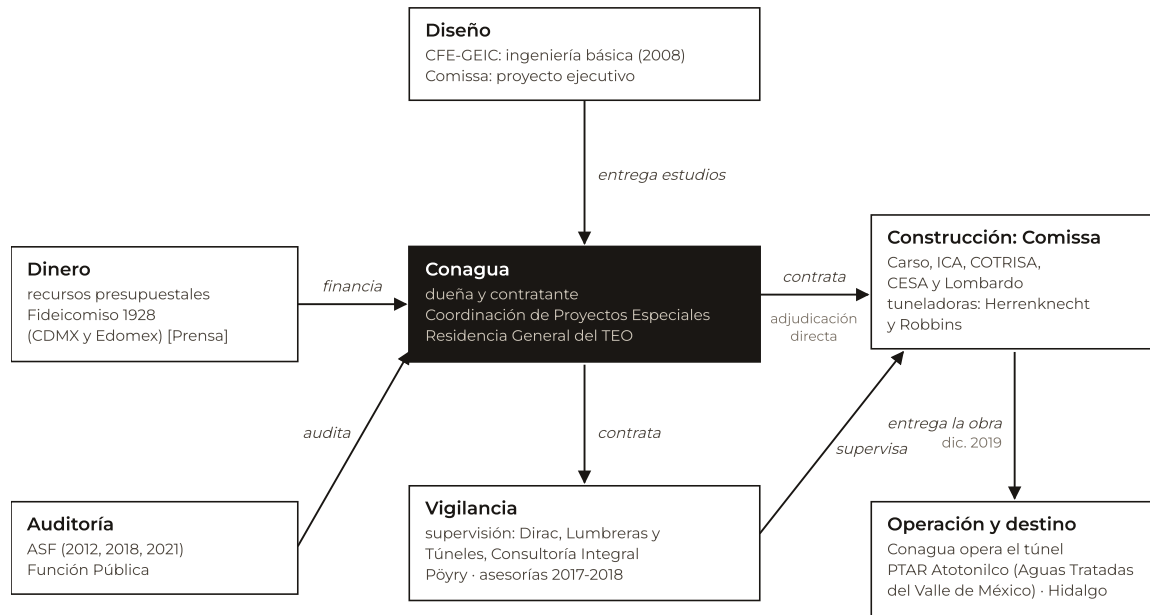
ASPECTO	CALDERÓN	PEÑA NIETO	LÓPEZ OBRADOR
Papel	Decide, contrata y arranca	Continúa, recalcula y amplía	Concluye e inaugura
Titulares de Conagua	Luege Tamargo	Korenfeld; Ramírez de la Parra	Jiménez Cisneros
Contratación	Adjudicación directa de obra, supervisión, tuneladoras y apoyo técnico	Convenios adicionales; asesoría por licitación	Convenios de plazo y monto de 2019
Hito principal	Inicio en 2008; convenios de 2011 y 2012	10.1 km en operación (13-06-2013)	Fin de excavación (23-05-2019); inauguración (23-12-2019)
Principal acierto	Reconocer el riesgo y actuar con rapidez	Mantener la obra y abrir el primer tramo	Concluir y entregar
Principal falla	Arrancar sin proyecto ejecutivo	Retraso y fechas incumplidas	Indirectos sin soporte y cierre tardío

Dato técnico: el inventario del proyecto ubicaba a Roberto Ramírez como titular durante todo el sexenio de Peña Nieto. La nota de La Jornada del 13 de junio de 2013 muestra que en la puesta en operación de los primeros 10 km el director era David Korenfeld. Ramírez de la Parra llegó en abril de 2015, tras la renuncia de Korenfeld por el uso de un helicóptero oficial.

Actores: dependencias y empresas

Conagua es la dueña y contratante de la obra, a través de la Coordinación General de Proyectos Especiales de Abastecimiento y Saneamiento, su Gerencia de Construcción y la Residencia General del Proyecto del TEO. La CFE, por medio de su Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, hizo por convenio la ingeniería básica: topografía, geología, geofísica, perforación, geotecnia, instrumentación, geohidrología, estructuras, ambiental y concretos. Los gobiernos de la Ciudad de México y del Estado de México aportan recursos por medio del Fideicomiso 1928; el gobierno de Hidalgo recibe la descarga y la PTAR. La Secretaría de la Función Pública aplicó retenciones de inspección y acompañó la firma del tercer convenio, la SCT intervino en el derecho de vía y la Semarnat autorizó la MIA con condicionantes. La UNAM aparece por dos vías: hizo las manchas de inundación del análisis costo-beneficio y participó en la definición del cambio de trazo del tramo 6.

Los contratos, sus montos y las empresas que participaron están en el capítulo 20. Conagua compró en 2008 tres escudos EPB Herrenknecht, dos de 8.70 m (S-497 y S-498) y uno de 8.89 m (S-519); las otras tres máquinas son Robbins EPB de 8.93 m. La asignación de cada máquina a su tramo está en el capítulo 14.



Elaboración propia con datos de ASF (2020, pp. 1-6) y González Ramírez (2023, p. 21). [Prensa]: dato solo en prensa.

Figura 21.4. Quién financió, diseñó, construyó, vigiló y audita el TEO

06

Contexto social del oriente del Valle de México

QUIÉNES VIVEN EN LA ZONA PROTEGIDA

El TEO da seguridad y servicios a "los casi 21.2 millones de habitantes" de la zona metropolitana. El beneficio directo más inmediato se concentra en los municipios mexiquenses del antiguo lecho lacustre. Los primeros 10.1 km, de L-0 a L-5, y la planta de bombeo El Caracol operan desde 2013 y "han ayudado a mitigar los riesgos de inundación en esa zona".

Tabla P.3. Población de municipios relacionados con el TEO y sus obras hermanas, Censo de Población y Vivienda 2020.

MUNICIPIO	HABITANTES	RELACIÓN CON EL TEO
Ecatepec de Morelos	1,645,352	Tramo 1, L-0 a L-5; primeros 10.1 km en operación desde 2013

MUNICIPIO	HABITANTES	RELACIÓN CON EL TEO
Nezahualcóyotl	1,077,208	Beneficiario del drenaje del oriente
Ixtapaluca	542,211	Cuenca del Río de la Compañía
Chalco	400,057	Cuenca del Río de la Compañía; inundaciones de 2000 y 2010
Valle de Chalco Solidaridad	391,731	Inundaciones de 2000, 2010 y 2011
La Paz	304,088	Cuenca del Río de la Compañía
Zumpango	280,455	Trazo del túnel
Chicoloapan	200,750	Cuenca del Río de la Compañía
Huehuetoca	163,244	Trazo del túnel; sitio de la inauguración
Teoloyucan	65,459	Trazo del túnel
Tula de Allende	115,107	Descarga y río Tula
Atotonilco de Tula	62,470	Portal de salida y PTAR
Atitalaquia	31,525	Distrito de riego 003
Tlahuelilpan	19,067	Distrito de riego 003
Ajacuba	18,872	Distrito de riego 003
Tetepango	11,768	Distrito de riego 003

VIVIR SOBRE UN LAGO QUE SE HUNDE

El oriente del valle (Ecatepec, Nezahualcóyotl, Chalco, Valle de Chalco, Ixtapaluca, La Paz, Chicoloapan) está construido sobre el fondo de los antiguos lagos de Texcoco y Chalco, donde el hundimiento es mayor. La combinación social es particular: municipios de crecimiento rápido, muchos de origen irregular, sobre arcillas lacustres que se hunden por la extracción de agua. En las márgenes del Río de la Compañía los hundimientos llegaron a 60 cm por año y en Valle de Chalco a 40 cm por año. Los canales a cielo abierto pierden pendiente o la invierten, los bordos se debilitan y el agua residual regresa a las colonias.

Tres episodios explican la presión social y política por una obra grande. En mayo de 2000 se rompió el bordo sur del Río de la Compañía: se inundaron casi 1,000 viviendas y resultaron afectados más de 50,000 habitantes de Chalco, Valle de Chalco e Ixtapaluca, y la autopista México-Puebla se cerró tres días. Como respuesta se construyó el Túnel Río de la Compañía, obra hermana del TEO de 6,777 m, 5 m de diámetro y 40 m³/s, que arrancó el 20 de junio de 2006. El 5 de febrero de 2010 el canal volvió a romperse y quedaron dañadas unas 3,000 casas en Valle de Chalco, Chalco e Ixtapaluca. El 17 de abril de 2011, 280 viviendas de Valle de Chalco pasaron unas 30 horas bajo aguas negras. Valle de Chalco, municipio creado en 1994 sobre el antiguo lago, tenía 357,645 habitantes y alta marginación [Prensa].

Por eso las inundaciones del oriente son inundaciones con aguas negras, con daños a la salud de la población, lo que explica que una obra de drenaje sin glamour haya tenido el apoyo de tres órdenes de gobierno y de partidos distintos durante once años.

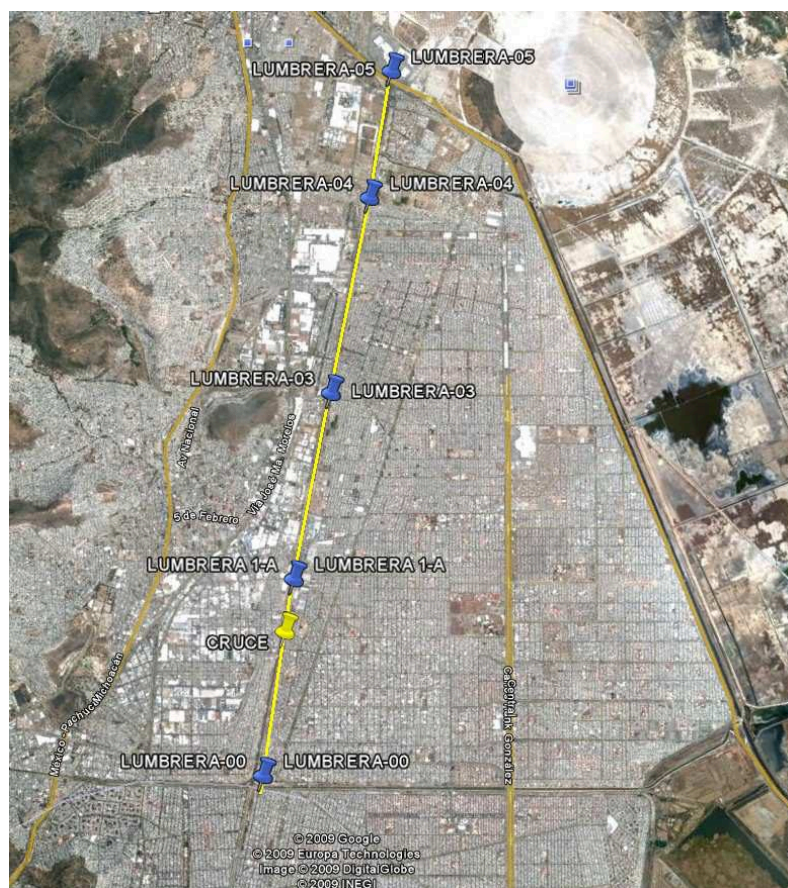


Figura 21.5. Ecatepec, de L-00 a L-05, sobre la mancha urbana

BENEFICIOS DECLARADOS Y SU ALCANCE

El TEO agrega 150 m³/s de capacidad y permite alternar con el Emisor Central para darle mantenimiento. Los funcionarios de Conagua hablaron en 2017 de un aumento de entre 60 y más de 70 % en la capacidad de desalojo, sobre una capacidad de los sistemas existentes de 210 m³/s.

Los límites los reconocieron los propios gobiernos: Peña Nieto dijo que mitigaría las inundaciones sin eliminarlas y Sheinbaum señaló en la inauguración que faltaban obras complementarias. La ASF anotó que cada año por lluvias atípicas están expuestas unas 15 colonias de Ecatepec y tres de Nezahualcóyotl. El TEO es una salida troncal; la protección real de cada colonia depende además de colectores, plantas de bombeo y del mantenimiento local. El comportamiento del túnel en las lluvias posteriores a 2019 está en el capítulo 17.

AFECTACIONES Y CONFLICTOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

El conflicto vecinal mejor documentado está en el tramo 2. "Los habitantes de la zona impidieron instalar los equipos", con el argumento de daños a sus viviendas por vibraciones y por el paso de vehículos pesados; Conagua cambió la logística, abasteció el concreto de la lumbrera 6 desde la lumbrera 7 y la ASF aceptó el cambio "por la problemática social".

En el tramo 6 hubo bloqueos de otro tipo. Pobladores cerraron las instalaciones de la lumbrera L-21A para exigir obras sociales, según un acta circunstanciada del 19 de mayo de 2014, y en el ejido Melchor Ocampo la comunidad pidió personal de apoyo vial para el camino por donde se accede a la L-24A. Las lumbreras nuevas L-21A, L-23A y L-24A implicaron predios y sitios de obra en Hidalgo, y en 2018 la asesoría contratada por Conagua hacía apoyo jurídico en la negociación para la compra y expropiación de terrenos y trámites de derecho de vía ante la SCT.

Contexto social del Valle del Mezquital

UN SIGLO DE RIEGO CON AGUAS NEGRAS

El Valle del Mezquital es una región semiárida de Hidalgo que, gracias al agua residual del Valle de México, se convirtió en zona agrícola de alto rendimiento: la agricultura del valle aporta 59 % de la producción del estado. Es la segunda región del mundo con mayor uso agrícola de aguas residuales, y el agua sin tratamiento "configuró" el espacio agrícola; los campesinos la llaman "oro negro" por los nutrientes que aporta. Los distritos de riego principales son el 003 Tula y el 100 Alfajayucan, además de Ajacuba, con alfalfa, maíz grano y avena forrajera como cultivos dominantes en el 003.

La región hidrológico-administrativa XIII riega 156,795.27 ha con agua residual de la zona metropolitana, con apoyo en un decreto presidencial que destina hasta 14.83 m³/s para riego en el Valle de Tula; el volumen de reúso ronda los 27.75 m³/s. La contracara es sanitaria y ambiental: coliformes, huevos de helminto, metales pesados, materia orgánica y salinidad en el agua de riego. Tras un siglo de recibir más de 725 millones de m³ al año de aguas negras, con más de 180 mil toneladas anuales de sólidos suspendidos, la región es descrita como "la cloaca más grande del país".

EL TEO Y LA PTAR ATOTONILCO

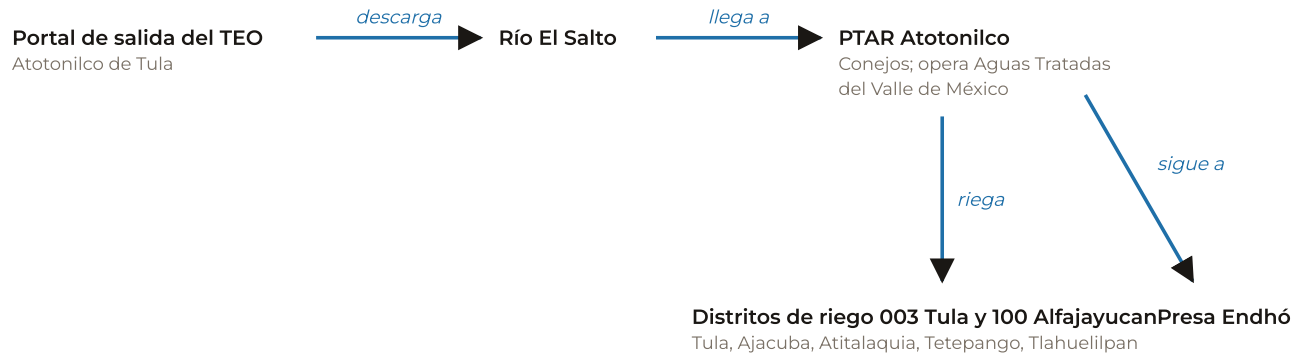
El TEO termina en el río El Salto, en el sitio donde se construyó la PTAR Atotonilco, en la localidad de Conejos, municipio de Atotonilco de Tula; de ahí el agua sigue a la presa Endhó. La planta la construye y opera el consorcio Aguas Tratadas del Valle de México bajo un esquema en el que el gobierno federal paga una contraprestación que incluye operación, mantenimiento y financiamiento (Conagua, s/f).

Para responder a la inquietud de los ejidatarios, la presentación del programa hizo cuatro promesas: el tratamiento "NO tendrá costo para los ejidatarios"; el agua tratada "NO se va a privatizar"; la cantidad para riego "NO va a disminuir significativamente"; y menos de 1

% se iría en lodos (Conagua, s/f). El programa hídrico regional 2021-2024 reconoce que el riego se hace ahora parcialmente con agua tratada y que falta "la plena aceptación del agua tratada" y resolver el pago del tratamiento.

A dónde va el agua del TEO en el Valle del Mezquital

esquema de flujo, sin escala; no es un mapa



Inicio de operación de la planta: 2016 (García-Salazar, 2019); 2017, con operación parcial e intermitente en 2016-2017 (Félix-Arellano et al., 2026).

Elaboración propia con datos de ASF (2020, p. 2), Conagua (s/f) y García-Salazar (2019, pp. 3 y 21).

Figura 21.6. A dónde va el agua del TEO en el Valle del Mezquital

PERCEPCIÓN DE AGRICULTORES Y COMUNIDADES

La PTAR "ha generado grandes controversias" entre los agricultores, agrupados en Usuarios en Defensa de las Aguas para uso agrícola de los Distritos de Riego 003 Tula y 100 Alfajayucan, A.C.. El temor es triple: pagar por el agua, perder volumen y perder los nutrientes. Un estudio reportado en la literatura indica que los fosfatos aumentan en el agua tratada y los nitratos y el nitrógeno amoniacal se mantienen, de modo que no se pierden los nutrientes esenciales, aunque los agricultores no confían en esa afirmación.

El estudio antropológico de dos comunidades vecinas documenta las expectativas iniciales de empleo e infraestructura con la llegada de la obra en San José Acoculco, y después malos olores, plagas y mayor percepción de riesgo; relata un episodio nocturno en que un fuerte olor a cloro hizo huir a los pobladores de sus casas, y que la planta negó ser la fuente. En Santa María Amajac analiza cómo el cambio en la composición del agua afecta el ingreso campesino. El autor interpreta el proceso como "acumulación por despojo", y esa es su interpretación, no un hecho medido.

En 2019 no existían estudios que documentaran los beneficios ambientales y sociales de la PTAR desde su puesta en marcha, y en mayo de 2022 se pidió a Conagua hacer pública la información sobre su operación, por denuncias de olores, vectores y familias que abandonaron temporalmente sus casas en San Antonio y San José. El río Tula, aguas abajo, trae su propio conflicto: el proyecto incluye rectificar 19 km del río, de los que unos 12 se revisten con concreto o geoceldas.

SALUD

El estudio longitudinal del Instituto Nacional de Salud Pública, la Universidad de Michigan y la UNAM encontró que vivir en comunidades que riegan con agua residual se asocia con más diarrea que en las que riegan con agua de pozo.

Dato técnico: razón de momios de 2.68 con agua tratada de forma intermitente (Tula) y de 3.58 con agua sin tratar (Ajacuba, Atitalaquia, Tetepango, Tlahuelilpan), comparadas con Tecozautla. Los autores advierten que el tipo de agua de riego funciona como marcador de condiciones ambientales y socioeconómicas, y recomiendan operación estable de la planta, saneamiento comunitario y evitar la recontaminación de los canales.

El TEO lleva más agua y con más regularidad a Hidalgo; si la PTAR no opera de forma estable, el beneficio de salud que justificaba el sistema TEO-PTAR no llega a la región receptora.

SEPTIEMBRE DE 2021 EN TULA

El 6 de septiembre de 2021, después de lluvias extraordinarias, se desbordaron los ríos Tula y Tepeji en el municipio de Tula, con 16 muertos, entre ellos pacientes del Hospital General de Zona 5 del IMSS, y unas 2,000 viviendas afectadas según datos preliminares. Conagua atribuyó el desbordamiento a las precipitaciones. Otros análisis sostienen que parte de lo ocurrido se relaciona con el drenaje del Valle de México: a las descargas de las presas Danxhó (50 m³/s) y Requena (120 m³/s) se sumaron cerca de 220 m³/s del Valle,

mientras el río conduce 250 m³/s. El programa hídrico regional prevé desazolver y ampliar 9.5 km del río para que transiten de 400 a 667 m³/s y rectificar 3.9 km para 600 m³/s. El capítulo 19 analiza el desempeño del túnel en ese evento.

08

Balance social por región

Hay un beneficio río arriba y molestias río abajo. El reparto es desigual: la seguridad se concentra en millones de habitantes del oriente, y las molestias y el riesgo de operación quedan en comunidades rurales pequeñas de Hidalgo. Para los regantes del Mezquital, el agua residual es también un recurso, y por eso su tratamiento genera conflicto.

Tabla P.4. Balance social del TEO por región.

ASPECTO	ORIENTE DEL VALLE DE MÉXICO	VALLE DEL MEZQUITAL (HIDALGO)
Beneficio principal	Menor riesgo de inundación con aguas negras; redundancia del Emisor Central	Agua para riego; tratamiento en la PTAR Atotonilco
Afectación durante la obra	Vibraciones, tráfico pesado y oposición vecinal en el tramo 2	Bloqueos por obras sociales en la L-21A, predios en el tramo 6 y tala de árboles en el río Tula
Afectación en operación	Inundaciones locales que el túnel no resuelve	Olores, plagas y percepción de riesgo cerca de la PTAR; desbordamiento del río Tula en 2021
Conflicto organizado	Bloqueo local de equipos	Usuarios en Defensa de las Aguas, DR 003 y 100; Red Queremos Vivir
Salud	Inundaciones con aguas negras	Diarrea infantil asociada al riego con agua residual
Discurso oficial	"Válvula de seguridad"; "continuidad y cambio"	Reúso agrícola que impulsará la economía regional
Percepción crítica	Sobrecosto, adjudicación directa y retraso de siete años	"Despojo" del agua y sus nutrientes; el problema "trasladado" al Mezquital

La percepción nacional, medida por la prensa, se centró en el sobrecosto y la adjudicación directa más que en estos efectos regionales. No existe una encuesta de opinión representativa sobre el TEO: la percepción ciudadana descrita sale de prensa, auditorías y estudios de caso.

El que más gana con el TEO es quien vive en el oriente y en la ciudad central, que ahora tiene una salida más y la posibilidad de revisar el Emisor Central. El que más soporta el costo es el vecino de Atotonilco de Tula y de Tula, con olores, un río que recibe 150 m³/s del túnel y un riesgo de desborde que antes no tenía esa magnitud. Una obra puede ser buena para el sistema y desigual para quien vive en su descarga, y esa es la discusión que el túnel sigue debiendo.

En resumen: la decisión de construir el TEO respondió a un riesgo real del sistema de drenaje y se tomó con urgencia en el gobierno de Calderón, a costa de arrancar sin proyecto ejecutivo. El gobierno de Peña Nieto mantuvo la obra, abrió el primer tramo y acumuló retraso e incumplimiento de fechas, y el de López Obrador la concluyó con observaciones sobre el cierre. Los beneficios se concentran en el oriente del Valle de México y las molestias y los conflictos, en el Valle del Mezquital.

AUDITORÍAS Y DOCUMENTOS OFICIALES

TESIS Y ARTÍCULOS

PRENSA [PRENSA]



Parte II • La línea de conducción del TEO

22

Lecciones del Drenaje Profundo

Lo que cuarenta años de operación le enseñaron al TEO

El Túnel Emisor Oriente no se diseñó sobre un terreno sin antecedentes. La Ciudad de México acumulaba casi cuarenta años de experiencia en túneles de drenaje a 30 m de profundidad, con errores documentados en tesis, derrumbes con ubicación precisa y una máquina de 1998 que resolvió un problema que el aire comprimido nunca pudo. La primera parte del capítulo lee esa historia como el repertorio de fallas que antecede al TEO. La segunda lo compara con cinco obras del mundo, con cifras de sus propios operadores, y señala dónde esas cifras no existen.

Los antecedentes generales de las obras de desagüe se tratan en el capítulo 3; aquí interesa lo que dejaron como lección.

En 30 segundos. El Emisor Central (1975) trabajó unos 15 años sin inspección, mientras las demás obras del sistema se hundían y perdían capacidad. El TEO existe por eso: añade 150 m³/s y permite cerrar un túnel mientras el otro trabaja. Cada decisión de máquina, profundidad y tratamiento del terreno tiene un antecedente en el Drenaje Profundo. Frente al mundo, el TEO es el más largo de los cinco túneles comparables en un solo trazo (62.4 km) y queda en el rango bajo de costo por kilómetro, con las salvedades de la sección 22.9.

01

Parte A. El sistema que el TEO heredó

CÓMO NACIÓ EL DRENAJE PROFUNDO

Las salidas artificiales del Valle de México son una cadena de soluciones parciales. El tajo de Nochistongo se inauguró en 1788, 151 años después de iniciarse. El Gran Canal del Desagüe, con su primer túnel de Tequixquiac, entró en servicio en 1900 y el segundo túnel en 1947. El Emisor del Poniente llegó en 1962 y el Emisor Central en 1975. Cada una resolvió un problema y dejó otro, casi siempre el mismo: la ciudad se hundía más rápido que la pendiente de los canales.

El Plan Maestro del Drenaje Profundo se presentó a las autoridades en marzo de 1959. Proponía enterrar los túneles a una profundidad que los hundimientos no alcanzaran, operarlos por gravedad y obtener así una obra durable y de bajo costo. Las obras empezaron en marzo de 1967, después de fijar los sitios de las lumbreras, de 25 a 225 m de profundidad y separadas entre 1 y 4 km.

La primera etapa, terminada en 1975, sumó 68 km de túneles: 50 del Emisor Central, 8 del Interceptor Central y 10 del Interceptor Oriente. Otra fuente descompone esa misma etapa con 10.01 km para el Central y 7.19 km para el Oriente, y confirma que ambos

tenían sección circular terminada de 5.0 m. Las fuentes no coinciden en el reparto; en este capítulo se usa el total de 68 km, que cierra con la suma de los tres túneles.

La elección del drenaje profundo sobre el bombeo tuvo una razón económica: una evaluación contra soluciones de bombeo y mixtas "dio la base decisiva". El análisis de beneficios (daños evitados contra costo de rehabilitar el sistema existente) resultó atractivo incluso para el financiamiento del Banco Mundial, que al final no fue necesario contratar. Es el mismo tipo de argumento que reaparece cuarenta años después en la Evaluación de Diseño del Programa K131 (capítulo 10).

COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema tiene dos tipos de piezas. Los interceptores recogen el agua de los colectores de la ciudad, a profundidades de 22 a 55 m según la tabla 22.1. El emisor es el tubo largo y grueso que la saca del Valle. En el centro está la lumbrera 0, donde el Interceptor Central y el Oriente se unen con el Emisor Central.

TABLA 22.1. DRENAJE PROFUNDO, SITUACIÓN A MARZO DE 1993. LOS KILÓMETROS CONSTRUIDOS MÁS LOS FALTANTES SUMAN EL PROYECTO. LA CAPACIDAD ES DE PROYECTO.

OBRA	PROYECTO (KM)	CONSTRUIDA (KM)	FALTA (KM)	DIÁMETRO (M)	CAPACIDAD (M ³ /S)	PROFUNDIDAD (M)
Emisor Central	49.8	49.8	0	6.5	220	48 a 217
Interceptor Central	21.6	16.2	5.4	5.0	90	22 a 41
Interceptor Oriente	25.5	16.7	8.8	5.0	85	37 a 55
Interceptor Centro-Poniente	16.5	16.5	0	4.0 a 4.5	40	22 a 51
Interceptor Centro-Centro	3.7	3.7	0	5.0	90	25 a 26
Interceptor Oriente-Sur	7.5	7.5	0	5.0	90	25
Interceptor Oriente-Oriente	14.6	2.1	12.5	5.0	90	24 a 30
Interceptor Poniente	15.0	15.0	0	5.0	90	28 a 31

Dato técnico: para el Centro-Poniente la tabla original trae 4.0 m, mientras el texto de la misma tesis habla de 5.00 m de excavación y 4.5 m terminados; por eso la celda muestra el rango. La profundidad del Emisor Central (48 a 217 m) coincide en orden de magnitud con las lumbreras de hasta 200 m que cita el texto.

Sumando lo construido en la tabla se llega a unos 127.5 km de túnel en marzo de 1993 (cálculo propio), sin contar los colectores semiprofundos de Iztapalapa y Canal Nacional-Canal de Chalco. El TEO, con 62.4 km, equivale a casi la mitad de todo ese sistema.

El Emisor Central aparece en las fuentes con longitudes de 49.4 a 50 km, diámetros de 6.0 y 6.5 m y capacidades de 170, 200 y 220 m³/s, según la tesis y el año.

Dato técnico: para el resto del capítulo se usan 49.7 km y 6.5 m, porque la fuente trae longitud, diámetro y capacidad en el mismo párrafo, y 170 m³/s como capacidad efectiva en 1975. Los 6.0 m de la tesis de 1972 corresponden con probabilidad a la sección interior de proyecto durante la excavación y no al diámetro final revestido.

Esa capacidad explica la necesidad del TEO. En 1975 la capacidad de desalojo era de 280 m³/s: 80 del Gran Canal, 30 del Emisor Poniente y 170 del Emisor Central. Para 2007 se había reducido a 165 m³/s, una caída de 41 % (cálculo propio) mientras la población pasaba de 10 a 19 millones de habitantes.

CÓMO SE CONSTRUYÓ

Los túneles del Drenaje Profundo se excavaron con métodos que cambiaron según el suelo, ordenados en cinco familias:

1. Sección completa con ademe primario de concreto lanzado o marcos metálicos.
2. Media sección con los mismos ademes.
3. Media sección con túnel piloto y ademes de madera y marcos.
4. Excavación con ranura.
5. Excavación con escudos, de frente abierto, de frente abierto con aire comprimido o de frente presurizado.

Los cuatro primeros se usaron donde el terreno aguantaba un tiempo sin caerse. Los escudos se reservaron para la zona lacustre, donde no.

Entre 1970 y 1975, la excavación cruzó sobre todo suelos duros, tepetates y rocas. Por primera vez en la Ciudad de México se emplearon escudos de frente abierto, entre las lumbreras 0 y 10 del Interceptor Central y de la 13 a la 0 del Interceptor Oriente. A partir de la lumbrera 10 hacia el sur, las arcillas eran tan blandas que hubo que introducir aire comprimido para sostener el frente, con presiones de hasta 1.3 kg/cm^2 .

La segunda etapa del plan extendió el Interceptor Central 5.3 km al sur, hasta 16.11 km construidos, y el Oriente 11.51 km, hasta 18.70 km. Para el Interceptor Oriente en suelo de lago, los estudios de mecánica de suelos pedían presiones de aire superiores a 1.3 kg/cm^2 . Eso dañaba al personal, obligaba a tiempos de descompresión muy largos y dejaba jornadas efectivas mínimas.

La salida llegó con dos escudos de frente presurizado con lodo, fabricados por la japonesa Okumura Machinery Corporation, con cabeza de 6.12 m. Una tesis de 1981 ya lo había anticipado: concluyó que el aire comprimido era impráctico y antieconómico en el Interceptor Oriente y propuso escudos cortadores estabilizados con fluidos.

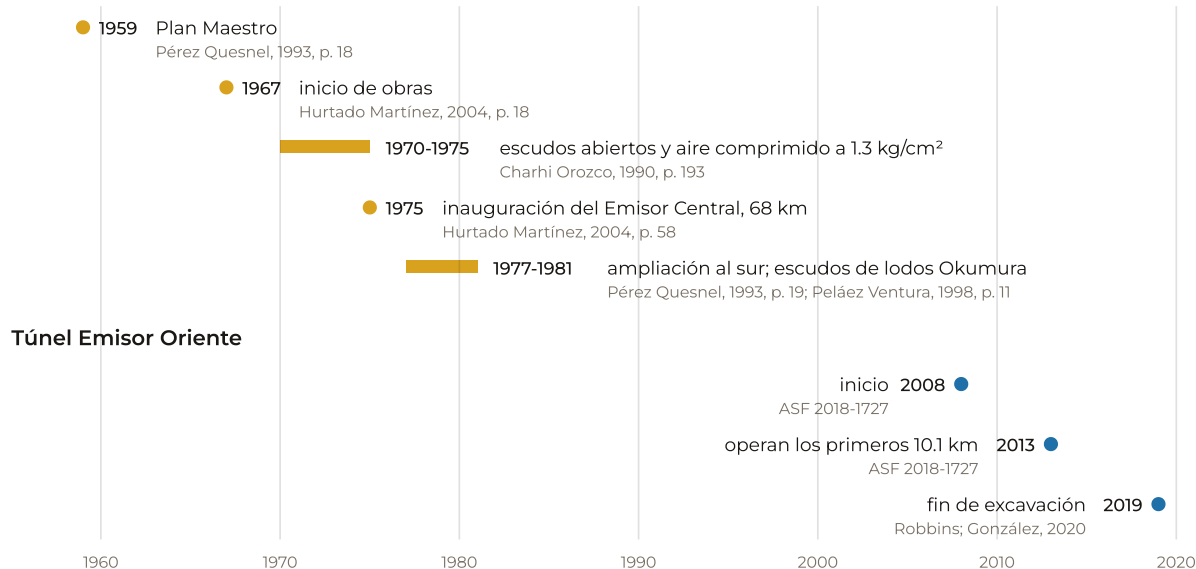
Los asentamientos en superficie bajaron de manera sustancial y el riesgo de falla del frente "ha sido prácticamente eliminado". Es una afirmación de tesis, no una medición.

El problema de la presión del aire sobre los trabajadores se resolvió hacia 1980 con la misma lógica con que en 2008 se eligió el EPB para el TEO: que la máquina sostenga el frente y las personas no respiren contra él. Es un caso en que una lección de obra termina convertida en decisión de diseño.

Del Drenaje Profundo al TEO

dos obras, una misma cuenca; cada hito con su fuente

Drenaje Profundo



Elaboración propia con las fuentes indicadas en cada hito.

Figura 22.1. Drenaje Profundo y TEO en una misma línea de tiempo

LO QUE SALIÓ MAL

El Drenaje Profundo tiene cuatro problemas documentados que importan para el TEO. Van en orden de aparición.

EL DERRUMBE DEL EMISOR CENTRAL, KM 15+804.22

En abril de 1971 la cuadrilla excavaba a sección completa el tramo entre las lumbreras 7 y 6 del Emisor Central, con explosivos, en una toba compacta de limos, arcillas y arenas. El frente sur de la lumbrera 7 estaba en el cadenamiento 15+804.22 del emisor, que equivale al 0+794.50 contado desde la lumbrera.

Hubo un aviso que no se leyó como tal. Poco antes, en el 0+780 desde la lumbrera 7, se desprendieron bloques que dejaron una bóveda de 6 a 10 m de altura hasta encontrar equilibrio. El derrumbe grande llegó sin indicio alguno, y por esa razón no se previó ningún sistema de seguridad.

La revisión del frente deja una lista de síntomas. El material venía de la clave, con una bóveda de 6 a 7 m de profundidad; el gasto de agua del frente subió a unos 20 L/s; el talud estaba saturado y sin consistencia; el último marco colado junto al frente quedó sobrefatigado y hundido. La formación identificada fue la Tarango. El terreno había sufrido descompresión, con grietas y bóvedas rellenas de material suelto, y la altura y el radio del vacío no se lograron determinar.

El tratamiento se hizo por fases:

1. Un tapón de madera en el frente y un pozo desde la superficie por donde se vació concreto para llenar las cavidades mayores.
2. Consolidación del terreno con inyecciones de lechada de cemento en dos fases y barrenos de drenaje.
3. Reapertura de la excavación por etapas: túnel piloto, partes laterales con avances de máximo 1.5 m, marcos metálicos cada 0.75 m con tablestaca de madera detrás, y un avance total máximo de 10 m por tramo, con control de presiones y gastos de inyección.

AIRE COMPRIMIDO: EL TÚNEL QUE EL PERSONAL NO PODÍA TRABAJAR

El segundo problema fue de la gente, no de la tierra. Con 1.3 kg/cm² de presión en el frente, el personal enfermaba por descompresión y la jornada efectiva se acortaba tanto que el avance se caía. Los turnos cortos con descompresiones muy largas resultaban antieconómicos.

La salida fue técnica: dos escudos de lodos propiedad del Departamento del Distrito Federal, cuyos trabajos se licitaban entre empresas.

HUNDIMIENTOS: 15 AÑOS SIN INSPECCIÓN Y UNA PENDIENTE QUE SE PERDIÓ

Son dos hundimientos distintos. El primero es el regional. El Colector Central bajó entre 4.3 y 4.8 m entre 1901 y 1952 en los dos puntos comparados, con máximos de 5.8 m en Emparán y Rivera de San Cosme y de 6.0 m en Alarcón y Bravo. Ese es el hundimiento que el Plan Maestro quiso esquivar enterrando los túneles. Con la teoría de consolidación

de Terzaghi se calcula que la superficie sobre los interceptores sigue bajando, de unos 3 a 19 cm por año según el método, en los cadenamientos 11+400 y 15+400 revisados. Son cifras de superficie; la tesis no mide el túnel.

El segundo es el funcional. Entre 1992 y 2007 el Emisor Central trabajó sin mantenimiento y fuera de sus condiciones de diseño, incluso a presión, cuando estaba pensado para escurrir por gravedad. La Evaluación de Diseño K131 cuenta 19 años de operación continua sin mantenimiento mayor y estima que la capacidad del Emisor bajó de 170 a 110 m³/s.

Conagua cuantificó el riesgo con apoyo del Instituto de Ingeniería de la UNAM: una obstrucción del Emisor Central inundaría más de 217 km² del centro y el oriente, más del 10 % de la superficie urbana, con más de 5 m de agua sobre el aeropuerto. Las obras de emergencia incluyeron cuatro plantas de bombeo de 9 a 21 m³/s, recuperaron 30 m³/s en el Gran Canal y subieron la capacidad de 165 a 195 m³/s. Aun así, quedaba por debajo de los 280 m³/s de 1975.

FALLAS, CAÍDOS Y UN CRUCE QUE SE REPITE

En el Interceptor Oriente, entre las lumbreras 8B y 11, se cruzó una falla importante que produjo caídos durante la excavación. Entre la 12 y la 13 el trazo volvió a cortar estratos del Complejo Santa Isabel y las lavas sanas del Cerro del Chiquihuite. Entre la 13 y la 0 la secuencia limoarenosa del Valle de Cuautitlán se atravesó "sin mayores dificultades". Ese cambio de suelo lacustre a lava, brecha y toba es parecido al que el TEO encuentra en sus tramos 3 y 4, con frente mixto de roca, arcilla y arena (capítulos 12 y 14).

DEL PROBLEMA PREVIO A LA DECISIÓN EN EL TEO

Se ponen lado a lado ocho problemas del Drenaje Profundo y lo que el TEO decidió después. Las fuentes del TEO casi nunca declaran que una decisión se tomó por un antecedente concreto; cuando la relación es una inferencia, así se indica.

1. Un solo emisor, sin respaldo. El Emisor Central operó de 1992 a 2007 sin mantenimiento y a presión, y la capacidad del sistema cayó de 280 a 165 m³/s. El TEO responde con un segundo emisor profundo de 62.4 km y 150 m³/s, que suma 315

m³/s con el Central y permite mantenimiento alternado. Los documentos oficiales lo plantean así de forma directa (capítulo 9).

2. Aire comprimido a 1.3 kg/cm². Había descompresión del personal y jornadas mínimas. El TEO usa seis tuneladoras de frente presurizado con presión de tierra (EPB), de 8.7 a 8.93 m de diámetro de excavación según la fuente (capítulo 14). El frente se sostiene con la tierra acondicionada y no con aire en el túnel. El capítulo 14 justifica el EPB por el terreno; la historia del aire comprimido es un antecedente, no una causa oficial.
3. Dos escudos de lodos y una planta de lodos. El escudo del DDF necesitaba bombas de suministro y extracción, tanques de sedimentación y una planta en superficie. El EPB usa la propia tierra como medio de sostén y no necesita planta de lodos (capítulo 14). Para el tipo de máquina la relación es directa; el vínculo con la experiencia previa es una inferencia.
4. Más frentes, menos meses. La tesis de 1981 calculó 300 m/mes por frente y propuso dos frentes para bajar de 52 a 26 meses los 15,600 m del Interceptor Oriente. El TEO trabajó con seis tuneladoras en seis tramos a la vez, y la última terminó de excavar el 23 de mayo de 2019 (capítulo 14). La lógica coincide, aunque ningún documento liga una obra con la otra.
5. Derrumbe sin aviso en tobas. En el km 15+804.22 el terreno estaba descomprimido, con agua en el frente y sin sistema de seguridad. En el TEO se hicieron estudios geotécnicos previos (capítulos 11 y 12) y el frente se sostiene de manera continua por la presión del escudo (capítulo 14). En lumbreras hubo tratamientos como el lodo fraguante de L-00, que subió el factor de seguridad de 0.59 a 3.5 (capítulo 15). La relación es una inferencia: el TEO tuvo problemas propios en lumbreras y no se afirma que no hubiera incidentes en frente.
6. Agua en el frente. En 1971 el gasto subió a unos 20 L/s justo antes del colapso. En el TEO se usaron pozos de abatimiento: en L-12 se estimaron 4.6 L/s y el bombeo real superó 600 L/s; el factor de seguridad por subpresión era 0.11 y se usaron 18 pozos (capítulo 15). El patrón es el mismo, el agua como causa y como alarma, aunque la tesina de L-12 no cita la de 1972.

7. Hundimiento regional. El Colector Central bajó de 4.3 a 4.8 m de 1901 a 1952, y la superficie sobre los interceptores sigue bajando 3 a 19 cm/año. El Plan Maestro eligió túneles a 30 m de profundidad media por esa razón. El TEO tiene profundidades de 25 a 150 m. Los capítulos 12 y 15 justifican la profundidad por la geología y las lumbreras más que por el hundimiento, así que la relación es una inferencia.
8. Meter un canal superficial a un túnel profundo. El Interceptor Oriente toma agua del Gran Canal en el km 6+985, por un cajón superficial de 957 m. Para captar más caudal se estudió un túnel semiprofundo de unos 1,000 m, 3.10 m de diámetro y dos lumbreras de 9.0 m, para 35 m³/s. En el TEO, el tramo I parte de la lumbrera 2 del Interceptor Río de los Remedios, en L-00 (capítulo 12). Son dos obras con el mismo problema y ningún vínculo documentado; funcionan como antecedente conceptual.

LO QUE EL TEO NO HEREDÓ

Hay cosas que el Drenaje Profundo no podía enseñar. La primera es la escala: túneles de 5.0 a 6.5 m y 30 a 50 m de profundidad media, contra 7.0 m interiores, excavación de 8.93 m y hasta 150 m de profundidad. La segunda es el contexto contractual. El DDF construyó su sistema con su propia dirección de obras hidráulicas y licitó los trabajos. Los contratos del TEO se dieron por adjudicación directa, con un mandato y un fideicomiso (capítulo 20).

La lección más dura viene del calendario. Entre el último mantenimiento del Emisor Central y su inspección (2008) pasaron 16 años. Un segundo túnel solo evita que el ciclo se repita si la operación del TEO se acompaña de un programa de inspección y mantenimiento escrito y probado. No se dispone de un manual de operación y mantenimiento publicado del TEO, y la sección de mantenimiento del capítulo 19 se apoya en la práctica general de túneles de drenaje.

El TEO resolvió el riesgo de depender de un solo emisor, pero no por sí solo el de volver a descuidarlo. Tener dos túneles permite cerrar uno para revisarlo mientras el otro trabaja, y eso es una ventaja real frente a 1992. La ventaja solo existe si la revisión se programa y se financia. La experiencia del Emisor Central indica que la obra civil dura décadas, pero la atención de quien la opera no, y por eso la conclusión del documento retoma este punto.

02

Parte B. El TEO frente al mundo

QUÉ SE COMPARA Y CON QUÉ REGLA

Se comparan cinco obras que sirven para lo mismo que el TEO o para algo muy cercano: sacar o guardar agua de lluvia y agua residual de una ciudad grande, bajo tierra y casi siempre por gravedad. Son el Thames Tideway de Londres, el túnel SMART de Kuala Lumpur, el TARP de Chicago, el DTSS de Singapur y el túnel de descarga subterráneo del área metropolitana de Tokio (conocido como G-Cans).

La regla de fuentes es más estricta que en el resto del documento. Una cifra entra al cuadro solo si viene del operador o dueño de la obra (Thames Water, MWRD de Chicago, PUB de Singapur, Ministerio de Tierras de Japón) o de un artículo técnico con autor y fecha. Wikipedia, la prensa y las páginas de turismo no cuentan. Donde no hay cifra oficial, la celda dice "no publicado".

LAS CINCO OBRAS, UNA POR UNA

TABLA 22.2. CIFRAS DE LAS OBRAS COMPARADAS. LAS LONGITUDES SON DE TÚNEL. "COSTO" ES EL MONTO NOMINAL PUBLICADO POR EL OPERADOR, SIN DEFLACTAR.

OBRA	LONGITUD	DIÁMETRO	COSTO	AÑOS	FUNCIÓN
TEO (México)	62.4 km	7.0 m interior; 8.93 m excavado	46,263.9 millones de pesos, costo total estimado	inicio 2008; término de construcción 2019	Segundo emisor profundo; 150 m ³ /s
Thames Tideway (Londres)	25 km	7.2 m (no se precisa si es interior)	£4,600 millones	construcción desde 2016; conexión con Lee Tunnel en mayo de 2024	Intercepta desbordes de alcantarillado combinado al río Támesis
SMART (Kuala Lumpur)	9.7 km de túnel pluvial; 3 km centrales compartidos con autopista	no publicado	RM 1,900 millones (proyecto completo, incluye autopista)	túnel perforado de 2004 a 2007; autopista abierta el 15 de mayo de 2007	Desvía crecidas del centro de Kuala Lumpur y, en los tramos centrales, lleva tránsito
TARP (Chicago)	110.4 mi (177.7 km, cálculo propio)	8 a 33 ft (2.4 a 10.1 m, cálculo propio)	US\$2,332 millones solo túneles y obras anexas, costos de adjudicación; US\$3,858 millones el plan completo con embalses	selección en 1972; túneles concluidos en 2006	Captar desbordes de drenaje combinado y evitar inundaciones

OBRA	LONGITUD	DIÁMETRO	COSTO	AÑOS	FUNCIÓN
DTSS (Singapur)	Fase 1: 48 km. Fase 2: 28 km más 7 km industrial	Túnel doméstico 3 a 6 m; industrial 3.3 a 4 m (Fase 2)	Fase 1: S\$3,400 millones. Fase 2: S\$6,500 millones	Fase 1 concluida en 2008; túneles de Fase 2 terminados en 2023	Conducir toda el agua residual por gravedad a plantas de recuperación
G-Cans (Tokio)	6.3 km	10.6 m interior	no publicado	marzo de 1993 a junio de 2006	Desviar crecidas de ríos pequeños al río Edogawa; cinco pozos de 15 a 31.6 m de diámetro y 66 a 71 m de profundidad

Lo que cada obra informa de sí misma importa más que el cuadro. Un comentario por obra, sin repetir las cifras.

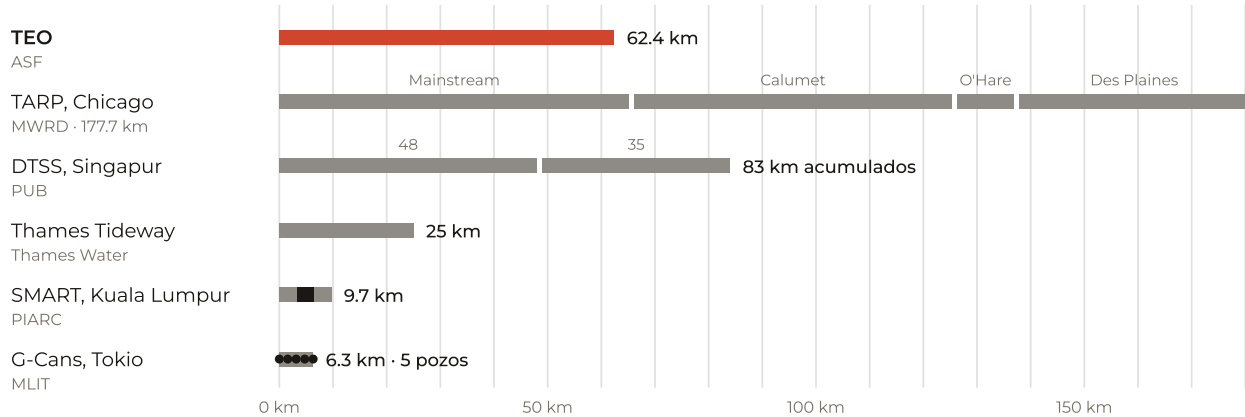
Thames Tideway es el pariente más cercano en forma: un solo túnel largo, de diámetro casi igual al del TEO, bajo el cauce de un río. Su profundidad va de 31 m en Acton a 66 m en Abbey Mills, con pendiente de 1 m cada 790 m. Se conectó en mayo de 2024 con el túnel Lee y ya intercepta desbordes. Se parece al TEO en la sección y se distingue en el trabajo: Tideway intercepta desbordes y los conecta con el túnel Lee; el TEO saca el agua de la cuenca.

SMART es la obra más singular del grupo y la más útil para entender el costo. El mismo túnel de 9.7 km sirve de desagüe de crecidas y, en tres kilómetros centrales, de autopista de dos niveles; con las rampas de entrada y salida el tramo vial llega a unos 4.5 km. El costo de RM 1,900 millones paga las dos cosas, de modo que dividirlo entre los 9.7 km de túnel sobrevalora el costo hidráulico por kilómetro. Su diámetro oficial no aparece en las fuentes del operador ni en artículos técnicos con autor y fecha, y el dato de 13.2 m que circula en enciclopedias queda fuera.

TARP es la obra más grande y la que mejor documenta su propio cálculo. El MWRD aclara que sus costos "no están en dólares de hoy" y que representan monto de contratos adjudicados, de modo que el cuadro mezcla dólares de las décadas de 1970 a 2000. El plan se aprobó en 1972 y los túneles se terminaron en 2006, el mismo año que G-Cans. La función es doble: proteger el lago Míchigan de las descargas de aguas combinadas y dar salida a las crecidas. La parte de embalses (Fase II) sigue en construcción, con fecha de operación de 2032 para la segunda etapa de McCook.

El TEO frente a cinco obras del mundo

arriba, longitud a escala; abajo, sección a escala



TARP: cuatro sistemas, 177.7 km (cálculo propio con millas del MWRD). SMART: en negro, el tramo central de 3 km que también es autopista.

Elaboración propia con datos de ASF, Thames Water, MWRD, PUB, MLIT y PIARC (ver tabla del capítulo).

Figura 22.2. Longitud y sección del TEO frente a cinco túneles del mundo

DTSS es la obra de Singapur, la más parecida al TEO por su intención, que es llevar toda el agua residual de una ciudad a una planta, pero es una red y no un túnel. La Fase 1 tiene 48 km de túnel y 60 km de colectores de enlace; la Fase 2 agrega 28 km de túnel doméstico, 7 km de túnel industrial y 63 km de colectores, con túneles de 35 a 55 m de profundidad. En 2017 PUB todavía hablaba de 30 km y 10 km, y de 60 km de enlaces; los números de 2023 son los de obra terminada. El costo de cada fase incluye plantas, colectores de enlace y obras anexas, no solo el túnel.

G-Cans tiene proporciones distintas. El túnel de 6.3 km corre 50 m bajo la carretera 16 y conecta cinco pozos de entre 66 y 71 m de profundidad, tres de ellos de 31.6 m de diámetro interior, con bombas en la descarga. Está pensada para recibir crecidas de pocas horas y tiene su propia cuenta de beneficios: el Ministerio de Tierras de Japón estima en 148,400 millones de yenes el daño evitado entre junio de 2002 y octubre de 2019. El

folleto oficial no publica el costo de construcción, por lo que no se calcula ni se estima. Las cifras de ¥238,000 millones (promoción turística) y ¥230,000 millones (reportaje de prensa) no son de fuente oficial y quedan fuera.

Las cinco comparten con el TEO que el gasto se reparte en piezas distintas: el túnel, los pozos o lumbreras, las plantas o bombas y, en algunos casos, la planta de tratamiento. Por eso el costo por kilómetro de este capítulo es un orden de magnitud y no una comparación de precios unitarios.

COSTO POR KILÓMETRO (CÁLCULO PROPIO)

El cálculo es una división de dos números con unidades y años que no coinciden. Sirve para ver si el TEO cae en el rango de las otras obras o fuera de él, no para decidir cuál obra fue mejor. Cada tipo de cambio es el promedio anual de la Reserva Federal (serie G.5A, vía FRED), del año que indica la tabla.

TABLA 22.3. COSTO POR KILÓMETRO DE TÚNEL (CÁLCULO PROPIO). LA COLUMNA DE DÓLARES POR KILÓMETRO RESULTA DE DIVIDIR EL COSTO EN DÓLARES ENTRE LA LONGITUD DE TÚNEL; EL COSTO NO ESTÁ DEFLACTADO.

OBRA	COSTO	AÑO DEL TIPO DE CAMBIO	TIPO DE CAMBIO (PROMEDIO ANUAL)	COSTO EN US\$ (CÁLCULO PROPIO)	USD MILLONES POR KM DE TÚNEL (CÁLCULO PROPIO)
TEO	46,263.9 millones de pesos	2018	19.2179 MXN por USD	2,407 millones	38.6 (÷ 62.4 km)
Thames Tideway	£4,600 millones	2024	1.2781 USD por GBP	5,879 millones	235.2 (÷ 25 km)
SMART	RM 1,900 millones	2007	3.4354 MYR por USD	553 millones	57.0 (÷ 9.7 km); incluye autopista
TARP, solo túneles	US\$2,332 millones	no aplica; dólares nominales de adjudicación, 1970s a 2006	no aplica	2,332 millones	13.1 (÷ 177.7 km)
DTSS Fase 1	S\$3,400 millones	2008	1.4140 SGD por USD	2,405 millones	50.1 (÷ 48 km); incluye enlaces, planta y emisario
DTSS Fase 2	S\$6,500 millones	2023	1.3428 SGD por USD	4,841 millones	138.3 (÷ 35 km); fase completa: túneles, enlaces y planta
G-Cans	no publicado	no aplica	no aplica	no publicado	no publicado

Dato técnico: para el TEO se usó el tipo de cambio de 2018 porque el costo viene de la auditoría 2018-1727 y el gasto se repartió entre 2008 y 2019; un solo año es una simplificación. Para Tideway se usó 2024, año de su conexión. El costo de SMART incluye la autopista en los mismos 9.7 km. TARP está en dólares de adjudicación de décadas distintas, por lo que sus 13.1 USD/km son el valor menos comparable. Los costos del DTSS incluyen más que túnel, así que su cociente por kilómetro es una cota superior.

El TEO queda en 38.6 millones de dólares por kilómetro, por debajo de Tideway (235) y de la Fase 2 de Singapur (138), y en el mismo orden de magnitud que SMART (57) y la Fase 1 de Singapur (50). Eso sostiene una lectura limitada: el costo por kilómetro del TEO no sale de rango frente a obras de ciudades ricas con tuneladoras parecidas.

El cálculo no sostiene dos lecturas frecuentes. La primera es que el TEO fue barato: se usa un costo total estimado de 2018 y la ASF registra que el contrato de obra subió de 9,595.6 a 20,702.8 millones de pesos y el plazo de 1,402 a 3,911 días (capítulo 20). La segunda es que el TEO fue caro: no existe una referencia común de qué incluye cada costo.

LO QUE LAS CINCO OBRAS INDICAN PARA EL TEO

En el costo, las obras que publican su cuenta lo hacen por componentes. El MWRD separa túneles de embalses y de cada sistema. PUB separa fases. El TEO tiene una cifra total de 46,263.9 millones de pesos (ASF) y varias auditorías con cortes distintos, pero el desglose público por tipo de obra (túnel, lumbreras, obras de captación, portal) no está publicado, por lo que no es posible armar un cuadro como el de Chicago.

En el uso del agua, Singapur y Chicago convierten el túnel en parte de un ciclo (NEWater en Changi; embalses y plantas en el MWRD). El TEO entrega el agua al río El Salto y a la planta de Atotonilco (capítulos 18 y 19). Lo que ocurre con el agua después del túnel resulta más revelador que la comparación del túnel mismo.

En el seguimiento, G-Cans publica el daño evitado (148,400 millones de yenes en 18 años) y TARP publica cuántos galones capturó McCook en su primera etapa. Lo que puede afirmarse del TEO desde 2019 se discute en el capítulo 19.

Dos comparaciones resultan más justas, según lo que se mire. Tideway es la más cercana en forma: un túnel largo, de diámetro parecido, bajo un río y excavado con tuneladoras. Singapur es la más cercana en propósito: llevar toda el agua residual de una ciudad a plantas de tratamiento. Ninguna es una copia del TEO, pero ambas permiten ubicar su costo y su función sin exagerar.

En resumen: El Drenaje Profundo aporta al TEO una secuencia de fallas y soluciones: el aire comprimido sustituido por escudos presurizados, el derrumbe sin aviso en toba y quince años de operación sin inspección. El segundo emisor corrige la dependencia de un solo túnel, aunque su valor depende de que la revisión periódica se programe y se financie. Frente a cinco obras del mundo, el costo por kilómetro cae en el rango bajo, con la reserva de que los costos publicados no incluyen lo mismo.



Parte II • La línea de conducción del TEO

23

Conclusión

¿Se construyó bien, mal o se usó bien la tecnología?

La pregunta de fondo de este documento admite tres respuestas posibles: la obra se construyó bien, se construyó mal o se usó bien la tecnología. Tras revisar auditorías, estudios, tesis y comunicados, la evidencia indica que las tres son ciertas a la vez, según el aspecto que se evalúe, y que separarlas es lo más útil que deja el TEO. Esta conclusión responde, en el orden en que se plantearon en "Objetivo, alcance y método", la pregunta detonadora y las seis preguntas de investigación. Se apoya en lo que los capítulos 7, 8 y 17 exponen sobre eficiencia, normatividad y funcionamiento.

01

Pregunta detonadora: ¿puede un túnel de 62 km resolver un problema que el Valle de México arrastra desde hace casi 600 años?

Resuelve una parte del problema, la que corresponde a la capacidad de conducción, y no resuelve la parte que el túnel solo traslada. El problema es tan antiguo como la ciudad: el albarradón de 1449, la primera gran obra contra el agua del Valle, tiene 577 años. Desde el socavón de Nochistongo, de 1607, la historia del Valle ha sido la de sacar el agua de una cuenca cerrada. El TEO cumple esa función: desaloja hasta 150 m³/s por gravedad y devuelve al sistema un segundo conducto profundo. Pero el túnel no actúa sobre el hundimiento que le quitó pendiente a las obras anteriores, y el agua que sale del Valle llega a Hidalgo con más caudal del que se trata. Un túnel de esta escala atiende el síntoma con la solución técnica correcta; el problema de fondo requiere además tratamiento del agua y medidas que reduzcan el volumen por conducir. Las respuestas siguientes detallan en qué sentido se cumple y en cuál no.

02

Por qué se perdió capacidad y por qué se eligió un segundo emisor profundo

El Emisor Central había perdido capacidad por el hundimiento del valle y no se pudo inspeccionar entre 1992 y 2007, según Conagua (2012). Un segundo túnel profundo, por gravedad, era la respuesta de ingeniería: sumaba capacidad y permitía revisar uno de los conductos mientras el otro

trabajaba. La única alternativa que Conagua comparó, un segundo Emisor Central, tenía la misma capacidad y casi la misma longitud. La elección del TEO es, por tanto, técnicamente sólida, aunque el análisis de alternativas fue limitado.

03

Tecnología, métodos y materiales frente al terreno

La tecnología respondió al suelo. Los escudos EPB con herramientas intercambiables cruzaron arcilla lacustre con 200 a 350 % de agua y basalto con abrasividad Cerchar de hasta 4.2. En el tramo 3, la misma máquina rindió 12.46 m por día en suelo y 4.85 en roca, y no se detuvo. Las lumbreras se usaron como talleres para cambiar herramientas, y la galería de montaje de la L-21A resolvió el arranque a más de 100 m de profundidad. Cambiar de frente sin detener la máquina es una decisión de logística además de equipo. El túnel funciona por gravedad con una pendiente de 0.19 % en los primeros tramos y de 0.1514 % después, sin bombeo en el recorrido principal. En este aspecto la obra se ejecutó bien.

04

Estudios previos frente a lo que mostró la excavación

Los estudios previos se quedaron cortos donde más importaba. En la L-12 se estimó un bombeo de 4.6 L/s y hubo que extraer más de 600 L/s, con un factor de seguridad por subpresión de 0.11 contra un mínimo de 1.3. En el tramo 5, los sondeos durante la obra mostraron presiones del agua hasta 30 m de columna distintas a las del proyecto ejecutivo. Un error de esa naturaleza no se corrige con voluntad: se paga en equipo de abatimiento, en tiempo y en riesgo

para el personal en el pozo. La respuesta es que los estudios fueron insuficientes para las zonas críticas, y que la geología fue la causa principal documentada del cambio de monto y plazo.

05

Costo y plazo frente a lo contratado

Se contrató antes de conocer el terreno. El contrato de obra se firmó el 14 de noviembre de 2008 por adjudicación directa, con base en un anteproyecto y en una ingeniería básica que hoy no es pública. El monto pasó de 9,595.6 a 20,702.8 millones de pesos y el plazo de 1,402 a 3,911 días: más del doble de costo y casi el triple de tiempo. La diferencia se explica sobre todo por las condiciones geológicas e hidrogeológicas no previstas y por un proyecto ejecutivo que se desarrolló durante la construcción. La contratación fue el aspecto peor resuelto de la obra.

06

Autorización ambiental, sustentabilidad y destino del agua

La autorización ambiental se dio para otra obra. La MIA de 2008 describía 24 lumbreras, cuatro años de construcción y 12,000 millones de pesos. Se construyeron 25 lumbreras en once años, y algunas quedaron a más de un kilómetro de donde la MIA las ubicaba. La MIA no analizó alternativas, hundimientos ni el abatimiento del nivel freático.

El mayor asunto abierto es el agua que llega a Hidalgo. La PTAR Atotonilco trata 35 m³/s en promedio y el túnel puede descargar 150. En tormenta, buena parte del agua llega sin tratar al río Tula y al Valle del Mezquital. Conagua previó una avenida máxima de 400 m³/s en la descarga conjunta de los túneles, y la inundación de Tula de septiembre de 2021 sigue sin un estudio técnico independiente que deslinde causas. Un túnel que saca el agua de un valle no resuelve el problema si lo traslada a otro, y la obra debió planearse junto con el tratamiento y no después.

Tampoco existe un documento oficial disponible que compare el TEO con captación de lluvia, recarga del acuífero o infraestructura verde. Estas medidas no sustituyen un drenaje profundo, pero pudieron reducir lo que el túnel tiene que conducir. La falla está en que la comparación no se haya documentado, aunque la decisión final hubiera sido la misma.

07

Transparencia y lecciones para proyectos futuros

La rendición de cuentas es incompleta. La ASF señaló montos por aclarar de 91.0 millones de pesos en 2018 y de 120.7 millones en 2021. El Libro Blanco de la obra es público, pero llega solo hasta junio de 2018, y no hay una serie oficial pública del desempeño del túnel desde 2019. Un túnel cuya operación no se puede revisar repite la situación del Emisor Central.

RECOMENDACIONES

De los hallazgos se desprenden seis recomendaciones para proyectos futuros:

1. Exploración geotécnica completa antes de contratar, con sondeos en cada lumbrera y a lo largo del trazo, y publicación de los resultados.
2. Contrato posterior al proyecto ejecutivo, por licitación, y con convenios justificados públicamente.

-
3. Actualización de la MIA cuando el proyecto cambia de forma sustancial, y publicación del cumplimiento de condicionantes.
 4. Crecimiento del tratamiento al ritmo de la conducción: un túnel de 150 m³/s requiere un plan para el agua que la planta no alcanza a tratar.
 5. Publicación de los datos de operación: gastos por evento, inspecciones y mantenimiento.
 6. Comparación y documentación pública de las alternativas, incluidas las que reducen el volumen por conducir, antes de elegir la solución.
-

08

Síntesis

La tecnología se usó bien para resolver un problema real con la solución correcta. La obra se construyó mal en la planeación, la contratación y la transparencia, y eso costó el doble y casi el triple de tiempo. Lo que sigue en juego es lo que pasa con el agua cuando sale del túnel.