



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA
DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TULA, HIDALGO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A N

**JUÁREZ DE LEÓN CARLOS RUFINO
MÉNDEZ SOSA DIANA ITZEL**

DIRECTOR: ING. ALBERTO ARIAS PAZ



MÉXICO D.F., 2013

Agradezco y dedico este trabajo:

A las mujeres de mi vida, a Elena y a mi Abi, por ser los pilares de mi persona.

A mi madre quien no sólo me dio la vida sino también su apoyo y comprensión siempre. A mi padre, mi símbolo de sabiduría, fortaleza y voluntad. A Tito, en reciprocidad al cariño y a la dedicación que me brindó hace ya algunos años.

A la señora Sosa y al señor Méndez por abrirme las puertas de su casa y convidarme de su atención y cariño. Celso, gracias por la inmensa ayuda. A Aída, siempre te estaré infinitamente agradecido por aquellos consejos que nos diste para superar cualquier adversidad.

A la hermosa familia que uno escoge, mis hermanos. Diego, gracias por tu amistad y apoyo en estos 13 años. Alfredo, por incluirte poco a poco en nuestro pequeño núcleo familiar. Alonso, mi hermano pero qué digo mi hermano mi imagen paterna. Pedro, gracias por el apoyo o negatividad según la necesitara. Darío, aún cuando no estés cerca siento ese ánimo y coraje para salir siempre de los problemas. Jorge, sé que seguiremos compartiendo momentos y pláticas agradables. Javier, “el nuevo hermano”. Karina, porque tu amistad es de esas que no se olvidan. Ale por aquellos momentos de risas y ocio en aquellas desveladas en tu depa. Nash, que tu boda sea mejor que la de tu hermana (Solano-Rojas, 2013). Alan, hermano, jamás olvidaré aquellas escapadas en los primeros semestres. Edgar, aunque nos dejaste te quiero.

A Jéssica, que ha sido más que una amiga, has sido mi guía espiritual y profesional, no sé qué hubiera hecho sin ti. Gracias por todos esos consejos. Lo mejor de nuestras vidas está por llegar.

Al Grupo de Hidrogeología en especial a Checs, Beto, Bere y Macías.

A Toño, a pesar de todo el estrés gracias por presentarme una de mis grandes pasiones en la vida: la hidrogeología.

Al doctor Enrique por su comprensión y apoyo en los trámites, en la tesis y en la vida.

A nuestro querido asesor con el que estaré siempre agradecido.

A Diana, el Sol que no deja de maravillarme, que nunca se esconde y que siempre me ilumina. Si escribiera una tesis por cada cosa que haya aprendido a tu lado ya estaría haciendo mi centésimo posdoctorado. Me resulta casi imposible plasmar en una simple hoja de papel algo tan especial como ese cariño, apoyo y amor tan extraordinario que me has dado. Gracias por adoptarme en esta tesis, la cual a base de risas, estrés, lágrimas, películas y arduo trabajo ha sido terminada. Podemos estar orgullosos del vínculo sentimental y de trabajo que se ha forjado. “Amarte a ti no es lo mejor, pero es perfecto”.

Y sobre todo, a mi Alma Máter.

AGRADECIMIENTOS

A la MÁXIMA CASA DE ESTUDIOS por permitirme formarme en la mejor universidad y brindarme una educación de calidad.

Al Dr. Gilberto Silva por inculcarme el amor a la geología, impulsarme y creer en mí durante la carrera.

Al Ing. Arellano Gil por enseñarme que el camino al éxito radica en la disciplina y el conocimiento.

Al Dr. Enrique González Torres por su incalculable apoyo, comprensión y tolerancia durante este proceso.

Al Ing. Alberto Arias por su tiempo y dedicación en esta tesis.

Al grupo de hidrogeología: Alberto Garfías, Verenice, Enrique Macias, Ing. Héctor Macias, Dr. Antonio Hernández y especialmente a Jesica Goya por valorar mi trabajo y confiar en mí para colaborar a su lado.

A Gabriela Vélez y Nayeli López por su apoyo moral incondicional.

A Carlos Juárez le agradezco no solo su apoyo y tolerancia en este proyecto, sino por permitirme encontrar en él al mejor compañero de tesis, amigo y consejero. Por ser una persona fundamental en un proceso de cambios, acompañarme en uno de los pasos más importantes de mi vida, por ayudarme a superarme más cada día y permitirme crecer a su lado.

A la familia de Carlos Juárez por el gran apoyo que nos han brindado durante la elaboración de esta tesis y hacerme sentir siempre en familia.

A Alberto Montesinos y Osvaldo López Beltrán a quienes considero parte de mi familia, por los mejores momentos que pasé durante mi estancia en la universidad, por confiar en mí e impulsarme en todos los proyectos. Por ser parte fundamental de mi vida y enseñarme las mejores cosas de la vida. Por todo lo anterior y mucho más, estoy inmensamente agradecida por permitirme ser parte de sus vidas.

Finalmente le dedico esta tesis a los pilares de mi vida, a mi padre que es mi mayor ejemplo a seguir y cuyo apoyo incondicional me ha permitido conseguir todos mis sueños. A la mujer que más amo y admiro, mi madre que ha hecho de mí una persona responsable y perfeccionista. A mis hermanas por enseñarme el camino correcto al éxito y brindarme la oportunidad de tener a mi lado a mis mayores consejeras, amigas, cómplices y por ser un ejemplo de vida para mí. A Celso que es como un hermano para mí y cuyo apoyo ha sido fundamental para la familia. A Ducky el niño que me roba todas las sonrisas cuando más se necesita y cuya compañía no tiene precio.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TULA, HIDALGO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I. INTRODUCCIÓN	
1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS	9
1.2.1 Objetivo general	9
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 ALCANCES	10
2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA	
2.1 CONCEPTOS BASICOS Y DEFINICIONES	11
2.1.1 Ley de Darcy	11
2.2 TIPOS DE ACUÍFERO	13
2.2.1 Acuífero libre	14
2.2.2 Acuífero confinado	14
2.2.3 Acuífero semiconfinado	15
2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS	15
2.3.1 Conductividad hidráulica	16
2.3.2 Transmisividad	16
2.3.3 Coeficiente de almacenamiento	17
2.4 PRUEBAS DE BOMBEO	17
2.5 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	21
3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO	
3.1 GEOLOGÍA	23
3.1.1 Geología histórica	23
3.1.2 Estratigrafía Regional	27
3.2 CLIMATOLOGÍA	34
3.3 HIDROLOGÍA	40
3.3.1 Hidrología Superficial	40
3.3.2 Hidrología Subterránea	41
4. METODOLOGÍA	
4.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	48
4.2 VERIFICACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS GEOLÓGICOS	50
4.2.1 Verificación geológica	50
4.2.2 Puntos de verificación de suelo	51
4.3 VERIFICACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	51
4.3.1 Verificación hidrogeológica	51
4.3.2 Pruebas de bombeo y recuperación	52
4.3.3 Geoquímica	53
4.4 SECCIONES	55

4.4.1	Sección geológica	55
4.4.2	Sección de flujo	57
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		
5.1	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA	59
5.1.1	Artículos científicos, tesis y reportes técnicos	
5.1.2	Mapas de la región	59
5.1.3	Cortes litológicos	60
5.1.4	Sondeos Eléctricos Verticales	62
5.2	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS GEOLÓGICOS	63
5.2.1	Verificación geológica	64
5.2.2.	Puntos de verificación de suelo	64
5.3	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	69
5.3.1	Verificación hidrogeológica	71
5.3.2	Pruebas de bombeo y recuperación	71
5.3.3	Geoquímica	80
5.4	SECCIONES	87
5.4.1	Sección geológica	92
5.4.2	Sección de flujo	92
5.5	MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TULA	95
		96
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN		
6.1	CONCLUSIONES	100
6.2	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	101
ANEXO 1		
	Base piezométrica kmz	I
	Puntos de verificación geológica	VI
	Puntos de verificación de suelo	XI
	Puntos de verificación hidrogeológica	XIV
	Fichas de inventario de puntos de agua	XX
	Datos geoquímicos	XXIX
ANEXO 2		
	Cortes litológicos	I
	Interpretación de pruebas de bombeo	XIII

RESUMEN

En la porción central del estado de Hidalgo, al nororiente de la ciudad de Tula, los derrames del Paleógeno-Neógeno correspondientes a los basaltos pertenecientes a la Formación San Juan y los depósitos de tobas de la Formación Tarango forman el sistema multi-acuífero más importante en el distrito de riego 03, y son la principal fuente de agua subterránea. Este sistema se encuentra limitado por un sistema estructural de *Horst y Graben*.

La principal recarga en la zona de estudio, además del agua de lluvia, se da desde hace varias décadas sobre los materiales granulares donde ocurre la infiltración de aguas residuales provenientes de la ciudad de México en las zonas de riego en aproximadamente 95, 000 hectáreas. Esta recarga ha propiciado el ascenso del nivel de agua en el valle hasta provocar zonas de inundación en algunos poblados, así como artesianismo o pozos brotantes.

Debido a lo anterior, existen descargas naturales en forma de manantiales que se encuentran en la porción norte, central y sur del área. En la porción noroeste se observa una serie de manantiales a lo largo del cauce del río Tula, que es el dren principal del acuífero dentro del área de estudio. Algunas de estas descargas naturales son de aguas termales y se localizan principalmente sobre los lineamientos estructurales.

Interdigitados en los materiales granulares se ubica un cuerpo de basaltos fracturados con un espesor aproximado de 170 m (que aporta importantes caudales de extracción del acuífero). Los derrames basálticos funcionan como la unidad hidrogeológica más importante del área de estudio, cuya extracción aproximada es de 100 l/s y se caracterizan por tener una firma resistiva en un amplio rango de 220 a 943 $\Omega \cdot m$.

El flujo subterráneo es preferente de sur a norte, y se bifurca subterráneamente a la altura del cerro Xicuco, en esta porción presenta una desviación al NE hacia Mangas y al NW hacia el río Tula.

ABSTRACT

In the central part of Hidalgo State, northwest to Tula city, some basalts spills of the Paleogene-Neogene from the San Juan Formation and the tuffs deposits from the Tarango Formation form the most important multi-aquifer system of the irrigation district 03, and is the principal source of groundwater supply. This aquifer is found by a structural system of horst and graben.

Besides the rainwater, the principal recharge in the study area has been going on during a few decades over the granular materials where infiltration takes place over an irrigation zone of almost 95, 000 hectares with wastewater from Mexico City. This recharge has led the rising of the water table in the valley till there are flooded zones in some villages, overflowing artesian, and overflowing wells.

Due to those reasons there exist natural discharges as springs, all located at the northern, central, and southern portion. In the northeastern portion there are located a series of springs all along the riverbed of the Tula river being the aquifer's main drain. Some of these natural discharges are hot springs and are located over the structural lineaments.

There is a basalt body interdigitated within the granular materials with a thickness approximate to 170 m (it provides significant volumes of extraction from the aquifer). The basalt spills function as the most important hydrogeologic unit of the studied area which extraction is close to the 100 lps and they are characterized for having a resistivity on a wide range from 220 to 943 $\Omega \cdot m$.

The underground flow is preferential from south to north, and it is bifurcated near the Xicuco hill, in this portion it presents a detour to the Northeast heading Mangas and to the Northwest to the Tula river.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La Zona Metropolitana del Valle de México cuenta con 21 millones de habitantes en una superficie de 8,084 km² (2,598 hab/km²) y es responsable de 21% del Producto Interno Bruto (PIB) del país. La intensa actividad económica, en combinación con una gran población viviendo en un valle situado a gran altura (2,220 msnm), ha creado un complejo problema de agua, relacionado no sólo con el suministro, sino con la eliminación de las aguas residuales.

La disponibilidad de agua en la ciudad de México es de 0.14 l/s por habitante. Aun así, dos tercios del área sufren de escases de agua debido a la distribución desigual de éste recurso. En 2004 la ciudad de México utilizó 85.7 m³/s de agua (figura 1) de los cuales, el 45% se suministró a través de la red, 21% fue bombeado directamente de los acuíferos locales para agricultores e industrias y 34% fue de aguas residuales tratadas, usadas para el riego de césped, refrigeración industrial, riego de jardines, fuentes, lavado de autos y llenado de lagos y canales para uso recreativo y ambiental. El agua (78 m³/s) proviene de: a) 1,965 pozos que bombean 57 m³/s del acuífero local; b) ríos locales ubicados en la parte sur de la ciudad (1 m³/s); c) de la región de Lerma (5 m³/s) y d) la región de Cutzamala (15 m³/s).

Se requieren al menos 38 m³/s más de agua potable para solucionar los problemas de abastecimiento de la ciudad de México. Parte de este volumen podría venir de un programa de control de fugas, sin embargo los costos son muy altos, por lo que se necesita otra fuente de agua. Existe la necesidad de transferir agua desde cuencas más lejanas, implementar un programa de reutilización de agua o recuperar las aguas residuales para consumo humano. Para ello se han propuesto varios proyectos, todos sin ser llevados a cabo o sin tener el éxito deseado. Entre los más destacados e importantes están: importar el agua del acuífero Libres-Oriental, Puebla, por la Comisión Nacional del Agua; El aprovechamiento del deshielo del volcán Citlaltepec, conocido también como Pico de Orizaba, proyecto propuesto entre la Facultad de Ingeniería y CONAGUA, el cual se encuentra aún en bases teóricas; finalmente, el proyecto Temascaltepec,

que pertenece a la cuarta etapa del Sistema Cutzamala, para este caso, la Comisión Nacional del Agua propuso aprovechar el caudal del río Temascaltepec mediante la presa de retención *El Tule*, para después trasladarla a través de un túnel de 17 kilómetros de longitud que cruzaría la Peña de San Luis hasta la presa de Valle de Bravo. Los estudios fueron realizados en 1996 por la Comisión Federal de Electricidad, desde entonces el proyecto se suspendió indefinidamente (sobre todo por cuestiones sociales).¹

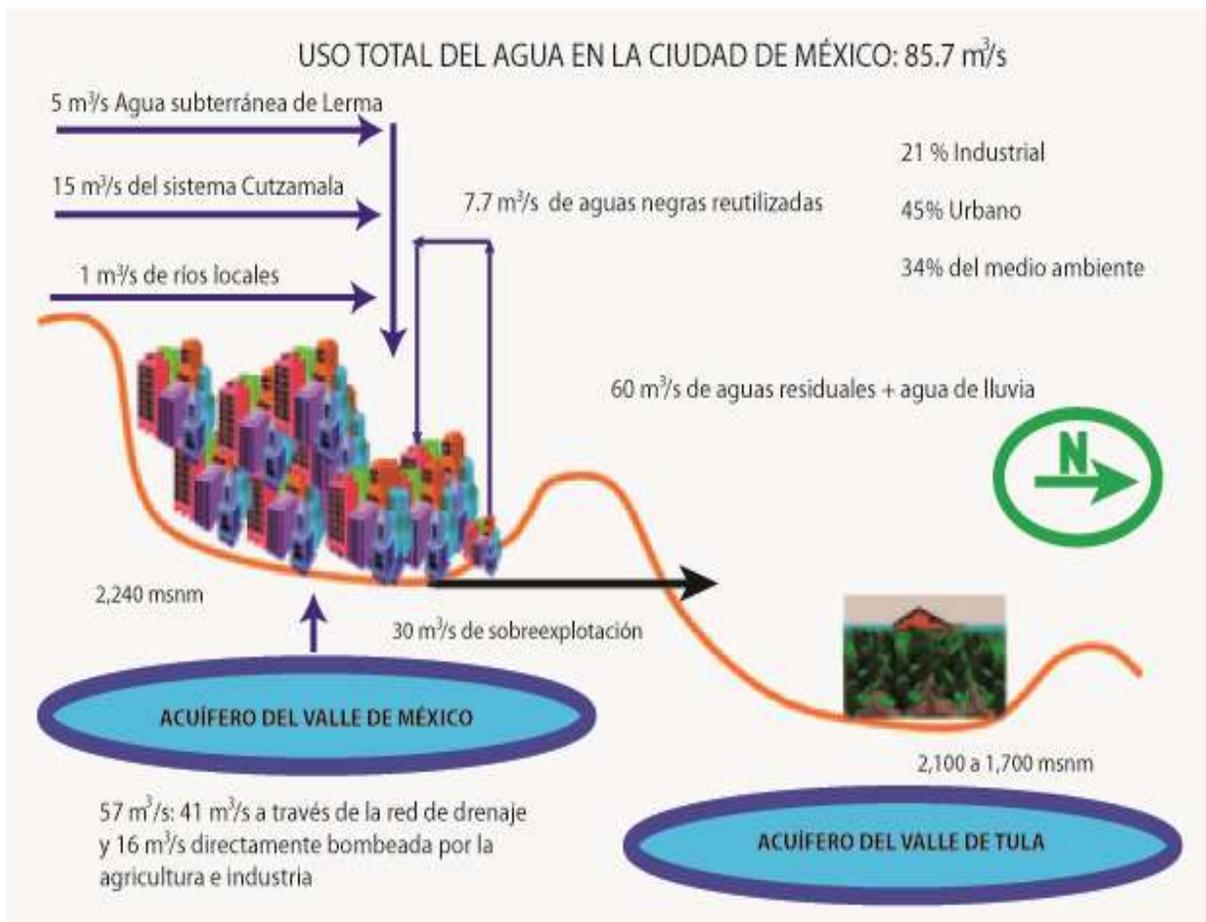


Figura 1. Fuentes de agua de la ciudad de México²

¹ Emilio, Fernández, <<http://movil.eluniversaledomex.mx/otros/nota31388.html>>, visitado el 3 de junio de 2013.

² Blanca, Jiménez, "The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys", en *The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, p.5, en <http://rosenberg.ucanr.org/documents/argentina/B_Jimenez_Final%20.pdf>.

Tomando en cuenta la proximidad (80 km), la poca diferencia de altitud (320 m) y una evaluación de la calidad del agua del acuífero del valle de Tula, se ha considerado al acuífero estudiado como una alternativa de recursos hídricos para la ciudad de México.

En 1995 se utilizaron 102 m³/s de aguas residuales para el riego de 256, 827 hectáreas, siendo México el país con la mayor área regada con agua residual no tratada. Esta área con 95, 000 hectáreas se conoce como *El Valle del Mezquital*, está localizada en el valle de Tula, en el estado de Hidalgo, y ha sido considerada como la mayor superficie de regadío utilizando aguas residuales en el mundo.

Las aguas residuales de la ciudad de México se han enviado al valle de Tula desde 1789, en donde se han utilizado para el riego agrícola desde 1896. Para evitar inundaciones y drenar el agua (drenaje combinado) en ésta ciudad se construyeron tres salidas artificiales (Emisor Central, Emisor Oriente y Gran Canal) destinadas para enviar las aguas negras hacia dicho valle. Desde 1890 eran enviados 60 m³/s de agua, de los cuales 80% corresponde a aguas negras y 20% a agua de lluvia.

Debido al gran volumen de aguas residuales (60 m³/s), enviado a través de canales sin revestimiento y al uso de tasas muy altas de riego, ha ocurrido la recarga artificial incidental del acuífero local. Esta recarga se estima en más de 25 m³/s. Como consecuencia, el nivel freático se ha elevado y varios manantiales han aparecido en las últimas décadas, con flujos de entre 100 y 600 l/s. Estos manantiales y algunos pozos son la fuente de agua de la región.

El uso de las aguas residuales se convirtió rápidamente en un medio de subsistencia, ya que permitió que la agricultura se desarrollara durante todo el año. Al darse cuenta de las ventajas, los agricultores solicitaron que el gobierno enviara más aguas residuales, y en 1920 se implementó un complejo sistema de irrigación. Posteriormente, los agricultores solicitaron la concesión de 26 m³/s de aguas residuales provenientes de la ciudad de México, mismas que, en este

momento, estaban disponibles, y dicha concesión fue aceptada por el presidente en 1955.

En la actualidad, la infraestructura de riego es aún propiedad del gobierno, en contraste con la situación del resto del país. Esta infraestructura se compone de nueve presas (tres de agua dulce y seis que contienen aguas residuales), tres ríos y 858 km de canales de riego para la distribución de agua (figura 1.1). El Valle del Mezquital se encuentra ubicado en el valle de Tula en el estado de Hidalgo, a 100 kilómetros al norte de la ciudad de México, tiene una población de 500,000 habitantes distribuidos en 4,100 km² y 294 localidades. La altitud del valle varía de 2,100 m en la parte sur cerca de la ciudad de México, y a 1,700 m hacia la parte norte. El clima es semiárido, con una temperatura media anual de 17 °C, una precipitación anual de 527 mm y una evapotranspiración de 1,750 mm. Por todo lo anterior, la economía se basa principalmente en la agricultura.

En general, los suelos agrícolas tienen bajo contenido de materia orgánica y necesitan de agua y nutrientes para ser productivos. Lo cual se solventa con la aplicación de aguas residuales no tratadas. El maíz y alfalfa son los cultivos principales (60-80% de la superficie) para ser utilizados como forraje, seguido por la avena, cebada, trigo y algunos vegetales (pimiento, calabacín italiano y remolacha). Gran parte de la producción se vende en la ciudad de México, pero también se utiliza en nivel local. El contenido de nutrientes de las aguas residuales ha mejorado el rendimiento de los cultivos de 67 a 150% para el maíz, cebada, tomate, avena, alfalfa, chile y trigo, en comparación con los regados con agua de primer uso (agua limpia). La seguridad de tener aguas residuales durante todo el año significa que dos de tres cosechas por año se pueden lograr en lugar de una. El impacto más visible es el auge de la economía local, ya que las tierras con acceso a las aguas residuales se alquilan en 455 dólares por hectárea al año, en lugar de 183 dólares por hectárea al año en áreas que utilizan solamente el agua de lluvia.

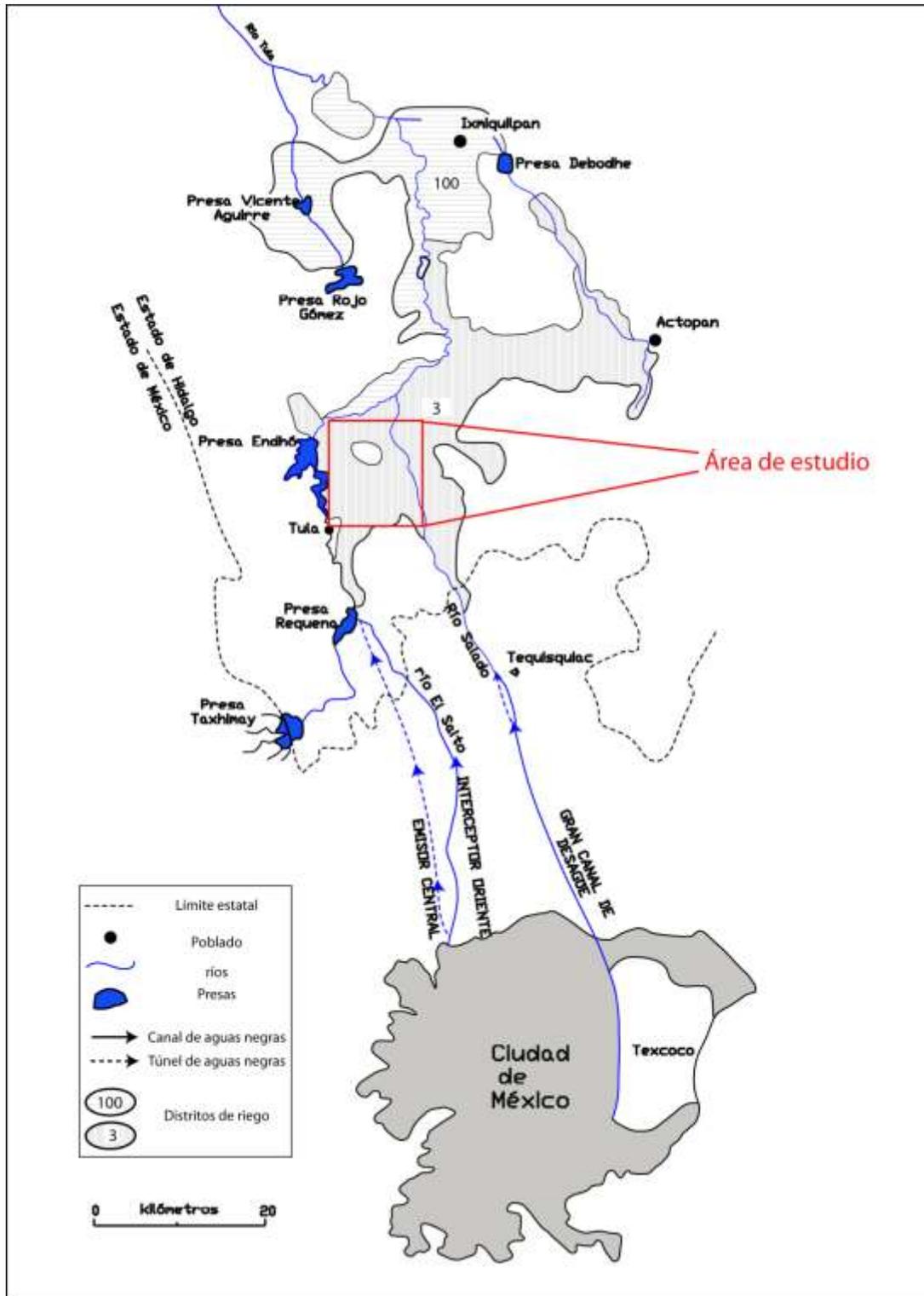


Figura 1.1. Sistema de drenaje de aguas residuales de la ciudad de México y los principales componentes del sistema de riego en el valle de Tula³

³ Blanca, Jiménez, *op. cit.*, p. 14.

El valle de Tula fue una región tan marginada que el gobierno consideró trasladar a los indígenas a otros sitios, debido a que sus tierras no eran aptas para producir alimentos. Actualmente, la situación ha cambiado radicalmente, pero a pesar de que estos efectos positivos se reconocen, otros se han producido. Las dos preocupaciones más importantes son la salud pública y los acuíferos. Con respecto a la primera, se demostró que las enfermedades diarreicas causadas por helmintos (gusanos) se han incrementado 16 veces en niños menores de 14 años de edad. La helmintiasis es la causa de la desnutrición que trae como resultado la disminución física y el desarrollo mental (10-15 cm de altura y 10-20 puntos de cloro).

El segundo impacto se refiere a la recarga incidental del acuífero con el agua residual utilizada para el riego, esto es una consecuencia del transporte y almacenamiento de las aguas residuales en infraestructura sin revestimiento, pero también es debido al método de riego y exceso de agua aplicada para controlar la salinidad en el suelo. La recarga del acuífero con agua residual fue reportada desde 1975, estimando que de 90 a 100% del acuífero del valle de Tula fue formado por las aguas residuales de la ciudad de México. En 1997, la tasa de recarga fue estimada por el British Geological Survey y la Comisión Nacional del Agua (1998) en al menos $25 \text{ m}^3/\text{s}$ sólo para uno de los distritos de riego. Este valor representa 13 veces la recarga natural, mientras que, para todo el valle (1998) estimaron que la tasa de recarga es de alrededor de $39 \text{ m}^3/\text{s}$.

La intensa recarga de las aguas subterráneas con aguas residuales no tratadas por más de 110 años ha elevado considerablemente el nivel de las aguas subterráneas. Entre 1938 y 1990 el nivel freático ascendió de 15 a 30 m y decenas de manantiales aparecieron con flujos que varían de 0.1 a $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal del río Tula aumentó de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ a más de $12.7 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 1945 y 1995 como resultado de ser abastecido por el agua subterránea adicional. Todas estas nuevas fuentes son utilizadas para el abastecimiento de 500,000 habitantes y para diversas actividades económicas. Un total de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ son utilizados para el riego agrícola (38%), industria (33%), consumo humano (17%) y otros usos (12%). El

agua se extrae de 283 pozos y manantiales. El agua es clorada únicamente antes de ser distribuida a los hogares.

En 1938, se empezó a notar un cambio en la calidad del agua de los pozos. En 1995, se reconoció oficialmente que el agua residual infiltrada era el origen, por lo que se comenzaron a realizar varios estudios para evaluar la calidad del agua. Durante el almacenamiento, transporte y uso repetido para el riego, el agua se descontamina por diferentes mecanismos físicos, químicos y biológicos, produciendo al final del valle agua de calidad semejante a la utilizada en la ciudad de México.

El uso de esta agua por la población local crea conflictos éticos. A pesar de la calidad resultante del agua, la presencia de contaminantes emergentes en algunas zonas del valle de Tula representa una preocupación que requiere analizar la decisión de utilizar o no esta agua en la ciudad de México.⁴

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

- Caracterizar el acuífero del valle de Tula, Hidalgo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir el modelo geológico del acuífero.
- Definir el modelo hidrodinámico del acuífero.
- Determinar parámetros hidráulicos.

⁴ Traducción y redacción basadas en los artículos: B., Jiménez, Chávez, A., "Quality assessment a potential use of an aquifer recharged with wastewater: El Mezquital case", en *Water Science and Technology*, 2004, p. 8. y B., Jiménez, "The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys", en *The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, p. 24.

- Determinar los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en el acuífero.

1.3 ALCANCES

De este trabajo se espera obtener una base de datos actualizada de bibliografía, litología, parámetros hidráulicos como la transmisividad y conductividad hidráulica, niveles estáticos, puntos de verificación geológica y edafológica, pruebas de bombeo y recuperación, además de parámetros fisicoquímicos.

Estudiar un sector del distrito de riego 03, comprendido en las siguientes coordenadas:

14Q	
$X_1 = 464,000$	$X_2 = 482,000$
$Y_1 = 2,235,000$	$Y_2 = 2,235,000$
$X_3 = 482,000$	$X_4 = 464,000$
$Y_3 = 2,214,000$	$Y_4 = 2,214,000$

Elaborar un mapa geológico, edafológico e hidráulico, así como secciones esquemáticas geológicas e hidrogeológicas que expresen los resultados alcanzados, utilizando las bases de datos generadas. Dichos mapas mostrarán la distribución espacial de las diferentes profundidades al nivel estático, carga hidráulica y diversos parámetros en la región. A través de pruebas de bombeo que son la herramienta principal disponible para el estudio del comportamiento del agua en los acuíferos. A partir de ellas se podrán obtener predicciones de caudales, abatimientos futuros y valores representativos de los acuíferos.

Con base en los mapas obtenidos se analizarán las zonas de mayor potencial hidrogeológico.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS Y DEFINICIONES

Este capítulo contiene conceptos de hidrogeología fundamentales para el estudio y comprensión del acuífero analizado.

2.1.1 Ley de Darcy

La ley de Darcy es una de las bases más importantes en el análisis del comportamiento y movimiento del agua en el subsuelo. De acuerdo a esta ley el flujo de un fluido a través de un medio poroso de área A es directamente proporcional a la pérdida de carga hidráulica y a un coeficiente k, e inversamente proporcional al trayecto recorrido (figura 2). Así, la ley de Darcy se expresa:

$$Q=kiA$$

o bien

$$Q / A = Vd = (k) (i)$$

Donde:

Q =Caudal (m³/d)

k =Conductividad hidráulica (m/d)

i = Gradiente hidráulico (adimensional)

A = Área transversal perpendicular al flujo (m²)

Vd = Velocidad aparente de flujo (m/d), también conocida como *velocidad de Darcy*.

La conductividad hidráulica (k) es una constante que depende de las propiedades del medio poroso.

De lo anterior se tiene que k representa la cantidad de agua que atraviesa una sección unitaria, perpendicular a la dirección de flujo, bajo un gradiente unitario, por lo que sus unidades son longitud/tiempo (m/d).

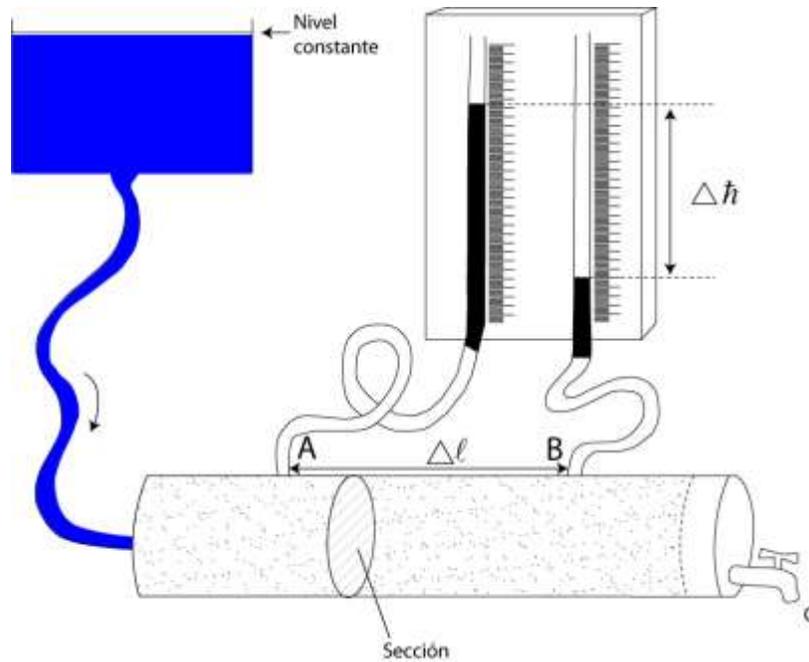


Figura 2. Instrumento experimental que ilustra la Ley de Darcy¹

A continuación se presenta el valor de k generalizado para distintos medios porosos.

MATERIAL	k (m/d)
Arcilla	10^{-5} a 10^{-7}
Limo	10^{-1}
Arena Fina	10^{-1} a 10^0
Arena Media	10^0 a 10^2
Grava	$> 10^3$

Tabla 2. Valor de k para distintos medios porosos

¹ < <http://poliyacimientos.blogspot.mx/2010/11/ley-de-darcy.html>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

2.2 TIPOS DE ACUÍFERO

El agua que se encuentra en el subsuelo suele circular libremente o puede formar parte de la estructura de las rocas. Se distinguen dos zonas en un acuífero. La no saturada y la saturada (figura 2.1).

La zona no saturada se extiende desde la superficie del terreno hasta la base de la franja capilar. Contiene numerosos espacios de aire que pueden representar un obstáculo al movimiento descendiente del agua. A partir de la superficie freática se considera el punto donde la saturación de agua es total, por lo que dentro de la zona saturada se encuentran diversas unidades hidrogeológicas que presentan diferentes capacidades para transmitir, ceder o almacenar agua.

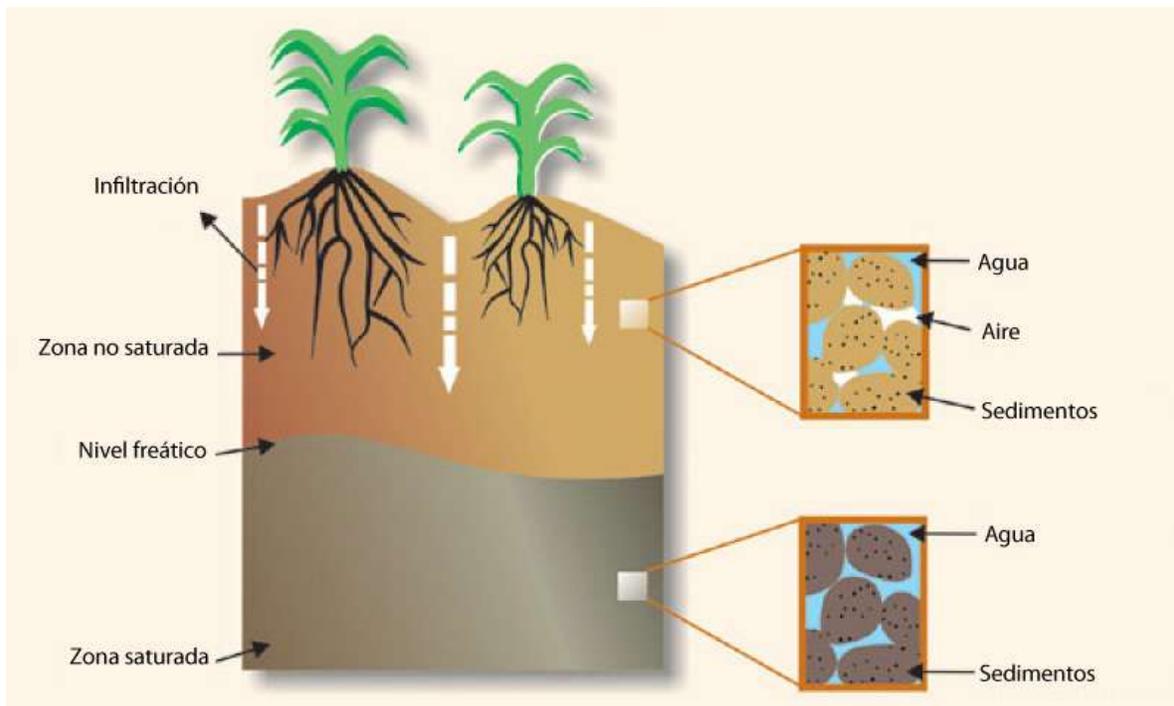


Figura 2.1. Esquema de la distribución de agua en el subsuelo²

Un **acuífero** es una unidad geológica permeable saturada de agua que transmite dicho fluido en cantidades significativas y, económicamente, su extracción es factible.

² <<http://www.lneg.pt/download/3056/fig3.jpg>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

Un **acuitardo** es una unidad geológica que cuenta con una baja conductividad hidráulica pero aún puede transmitir o ceder cantidades considerables de agua a escala regional.

Un **acuicludo** es una unidad geológica que contiene agua, pero no la transmite y por lo tanto es imposible extraerla de manera apreciable.

Finalmente, un **acuífugo** es una unidad geológica que no contiene agua ni puede transmitirla. Estas unidades las conforman generalmente las rocas cristalinas no alteradas y rocas metamórficas sin foliación.

Desde el punto de vista hidráulico, existen tres tipos de acuíferos: libres, semiconfinados y confinados.

2.2.1. Acuífero libre

Un acuífero es considerado libre cuando presenta como límite superior la superficie freática y como límite inferior una unidad impermeable. La superficie freática tiene una presión igual a la atmosférica.

Al ser bombeado un acuífero libre el agua almacenada se mueve por efecto de la gravedad hacia el nivel freático conforme éste desciende. Este mecanismo es conocido como *rendimiento retardado*, y es una característica de dicho acuífero.

2.2.2. Acuífero confinado

El acuífero confinado se encuentra limitado en su parte inferior y superior por unidades geológicas impermeables. En un acuífero de este tipo la presión del agua es generalmente más elevada que la presión atmosférica. A diferencia de los acuíferos libres, al perforar un pozo en este tipo de acuíferos el nivel piezométrico se eleva por encima del techo del mismo.



Figura 2.2. Acuífero libre y confinado con sus respectivos niveles³

2.2.3 Acuífero semiconfinado

Un acuífero semiconfinado se encuentra limitado en la parte superior e inferior por acuitardos. Cabe señalar que la presencia del acuitardo produce un aporte de agua mediante el factor de goteo; se observa generalmente en las pruebas de bombeo como una aparente recarga temporal.

2.3 PROPIEDADES HIDRÁULICAS

Las propiedades hidráulicas determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden almacenar, transmitir y ceder las unidades hidrogeológicas. Estas propiedades dependen de factores como la granulometría, mineralogía y factores

³<[15](https://www.google.com/search?q=agua+en+el+subsuelo&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ei=Sv gLUpnMPIP2gWO14CICw&ved=0CAkQ_AUoAQ&biw=1241&bih=567&sei=TPgLUtOwJlbq2AXD64HYAQ#bav=on.2,or.r_qf.&fp=82ac81df6154464b&q=nivel+piezometrico&sa=1&tbm=isch&facrc=_&imgdii=_&imgrc=6RtokmzUaeKFvM%3A%3BxqnhV9tH03luyM%3Bhttp%253A%252F%252Fpendientedemigracion.ucm.es%252Finfo%252Fdiciex%252Fproyectos%252Fagua%252Fimagenes%252Fimagenes_web%252Facuifero_15.JPG%3Bhttp%253A%252F%252Fpendientedemigracion.ucm.es%252Finfo%252Fdiciex%252Fproyectos%252Fagua%252Fesc_sub_acuifero.html%3B396%3B218>, visitado el 17 de agosto de 2013.</p>
</div>
<div data-bbox=)

geológicos posteriores a la génesis (compactación, cementación, fracturamiento, erosión, etcétera).

2.3.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (k) es la cantidad de agua que bajo condiciones físicas específicas circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario (mencionado previamente en la Ley de Darcy). Esta propiedad depende de las características del fluido y de la permeabilidad del medio poroso a través del cual circula.

Cuando el acuífero es isotrópico la conductividad hidráulica en el eje X será la misma en el eje Y y en el eje Z, por el contrario, si es anisotrópico los valores serán distintos entre ellos. Tiene dimensiones de longitud sobre tiempo (m/d).

2.3.2 Transmisividad

La transmisividad es una propiedad que determina directamente el rendimiento del espesor del acuífero. Por ella se puede calcular la cantidad de agua que puede proporcionar un acuífero o estimar el rendimiento probable de un pozo.

Se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección vertical de un metro de anchura y de altura, igual al espesor saturado del acuífero, afectado por un gradiente hidráulico cuyo valor es igual a uno. Tiene dimensiones de longitud al cuadrado sobre tiempo (m^2/d o m^2/s).

En general, la transmisividad de un acuífero es representada por el producto de la conductividad hidráulica promedio y el espesor saturado con que se cuenta.

$$T = (k) (b)$$

Donde:

T = Transmisividad del acuífero (m^2/d)

k = Conductividad hidráulica promedio del acuífero (m/d)

b = Espesor saturado del acuífero (m)

2.3.3 Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento (S) determina la capacidad que tiene el acuífero para almacenar o ceder agua. Se define como la cantidad de agua que libera una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende una unidad. S es un coeficiente adimensional.

Se considera que los acuíferos libres trabajan con un S_y (porosidad eficaz) y los confinados con S_s (almacenamiento específico) cuyas dimensiones de éste último son $1/m$.

2.4 PRUEBAS DE BOMBEO

Una prueba de bombeo tiene como objetivo determinar las propiedades hidráulicas del acuífero. Este tipo de pruebas estudian al acuífero mismo y al pozo, mas no a la capacidad de la bomba. Estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas, tanto locales, como regionales acerca del flujo del agua subterránea.

La metodología consiste en bombear agua de un pozo del acuífero, que se desea estudiar durante cierto tiempo, a un caudal determinado, y medir la evolución del nivel piezométrico (abatimiento o recuperación según la etapa que se trate) del pozo de bombeo y de los pozos de observación.

A partir del comportamiento del abatimiento del nivel, el caudal de extracción y la distancia entre los pozos de observación y el de bombeo, se obtiene información sobre las características del acuífero.

Como el abatimiento y la recuperación de los niveles son mayores durante las primeras dos horas, las lecturas se deben realizar en intervalos cortos, éstas van aumentando conforme se prolonga el bombeo. En la tabla 2.1 se sugiere una secuencia de intervalos de tiempos, aplicables para el pozo de bombeo, así como

para los de observación. Se recomienda que se realicen mediciones de conductividad eléctrica, pH y temperatura.

Núm. De lectura	Tiempo a partir del inicio de bombeo
1	0 seg
2	15 seg
3	30 seg
4	45 seg
5	60 seg (1 min)
6	2 min
7	4 min
8	8 min
9	15 min
10	30 min
11	45 min
12	60 min

Tabla 2.1. Secuencia de intervalos de tiempo para la medición de niveles de agua durante una prueba de bombeo

Es recomendable que una buena prueba de bombeo se termine hasta que exista una notable estabilidad en el nivel dinámico o estático (condiciones de flujo permanente). Como las estabilizaciones del nivel piezométrico son casi siempre aparentes, se recomienda prolongar el bombeo hasta conseguir la respuesta real del tipo de acuífero que permita la interpretación correcta de la prueba. Para la prueba de recuperación se deben tomar las medidas con la misma secuencia de tiempos.

La medición de la profundidad al nivel freático se puede realizar mediante una sonda *Solinst* (figura 2.3).



Figura 2.3. Sonda Solinst de 300 m⁴

Tomando en cuenta las características del acuífero se puede realizar un esquema de la caracterización del tipo de acuífero. Además, para cada caso se puede emplear una curva teórica abatimiento-tiempo en escalas logarítmicas (figura 2.4).

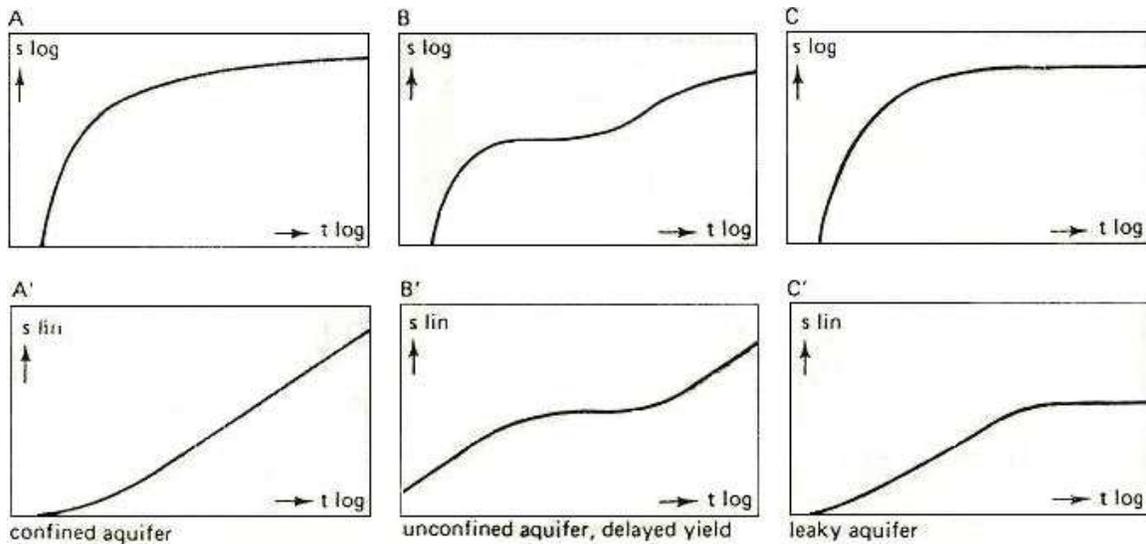


Figura 2.4. Curva teórica de abatimiento (s)-tiempo (t) para cada tipo de acuífero

⁴< <http://es.envirotecnics.com/pwimg-producte-800-1-0/interfasemeter.jpg>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

MÉTODO	CONSIDERACIONES NECESARIAS
Neuman (1975)	<ul style="list-style-type: none"> • El acuífero es isotrópico o anisotrópico • El flujo en dirección al pozo es transitorio • La influencia de la zona no-saturada sobre el área de abatimiento es despreciable • $S_y/S_a > 10$ (Volumen de agua liberada por unidad de área y por unidad de abatimiento del nivel freático (Rendimiento específico). Volumen de agua almacenada liberada instantáneamente por unidad de área y por unidad de abatimiento) • Los pozos de bombeo y de observación son de penetración total • El diámetro de los pozos de observación y de bombeo se consideran pequeños, es decir el almacenamiento de agua en ellos puede ser despreciable • No existen pérdidas de cargas en el pozo de bombeo
Theis (1935) $s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$	<ul style="list-style-type: none"> • El flujo hacia el pozo es transitorio, es decir, las diferencias de abatimiento con el tiempo no son despreciables ni tampoco el gradiente hidráulico es constante.
Cooper-Jacob (1946)	<ul style="list-style-type: none"> • El acuífero es de extensión infinita • El acuífero es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme • El pozo es totalmente penetrante • El flujo hacia el pozo es horizontal • El acuífero es confinado • El flujo es inestable • El diámetro de pozo es pequeño y su almacenamiento es despreciable • $u < 0.1$
Hantush (1960) o Hantush III (Método de Ajuste de Curvas)	<ul style="list-style-type: none"> • El flujo hacia el pozo se presenta en régimen transitorio • Los cambios de almacenamiento en el acuitardo son apreciables como para influenciar los abatimientos en el acuífero a tiempos finales de la prueba.
Rushton (1979)	<ul style="list-style-type: none"> • Las pruebas de bombeo son demasiado largas (varios días) • El diámetro del pozo es grande y se toma en cuenta el almacenamiento en él
Tartakovsky-Neuman (2007)	<ul style="list-style-type: none"> • El acuífero tiene extensión infinita • El acuífero es homogéneo, isotrópico y de espesor uniforme • El acuífero es libre • El flujo es inestable • El diámetro del pozo es pequeño

Tabla 2.2. Métodos de interpretación de pruebas de bombeo y sus consideraciones

Además de las consideraciones individuales de cada método siempre se deberá tener en cuenta las siguientes limitantes:

- El acuífero es libre, confinado o semiconfinado
- La superficie freática se encuentra en forma horizontal antes del bombeo
- El acuífero es bombeado a caudal constante
- El pozo es de penetración total o parcial, y recibe agua de todo el espesor del acuífero
- El agua entra al pozo debido a los gradientes hidráulicos provocados por el bombeo⁵

2.5 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES (SEV)

Son métodos de prospección geoeléctrico cuya finalidad es investigar potenciales eléctricos naturales; empleando un campo eléctrico artificial, creado desde la superficie mediante el paso de la corriente en el subsuelo, a fin de obtener como respuesta determinadas propiedades eléctricas intrínsecas de los materiales.

Corresponden a una serie de medidas realizadas alrededor de un punto; en donde se aplica corriente eléctrica a cierta distancia para obtener lecturas de resistividad. Estas diferentes medidas que se van realizando permiten crear una curva que posteriormente será analizada y se interpretará para identificar las profundidades a las cuales se puede encontrar el objetivo de exploración.⁶

Los SEV son utilizados, en este caso, para identificar cuerpos de interés hidrogeológico y establecer direcciones de flujo de agua subterránea, espesores de unidades y geometría de cuerpos en el subsuelo.

Este método permite identificar zonas con potencial de agua subterránea e intercalaciones de sedimentos mediante la resistividad, es decir, a mayor

⁵ Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*, 2007.

⁶ < <http://mibexltda.com/geofisica/geofisica-sondeos-electricos-verticales/>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

resistividad se puede suponer que hay menor saturación de agua, pues ésta es conductora de la electricidad debido a la presencia de sales disueltas.⁷

⁷ Javier Alexander, Ibáñez Martínez, *Estudio geofísico de resistividad para evaluar el impacto ambiental del subsuelo en el relleno sanitario de nogales, Sonora*, Tesis de grado, México, 2009.

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1 GEOLOGÍA

La geología histórica y estratigrafía, servirán para entender la cronología de los eventos que dieron lugar a las unidades en el subsuelo del valle de Tula.

3.1.1 Geología histórica

Periodo Cretácico

El ambiente de aguas someras prevaleciente durante el depósito de la *Formación El Doctor* determinó la sedimentación de micrita y aloquímicos de carbonato de calcio, junto con restos de moluscos y otra fauna marina, constituyendo el Banco calcáreo de Ixmiquilpan próximo al área de estudio. En torno a este *Banco*, la profundidad del agua era mayor, por lo que predominaban capas de calcilimolita y calcarenita con poco pedernal. La dolomitización de algunas de las capas de esta formación tuvo lugar durante la época de consolidación y litificación de sedimentos calcáreos en el fondo del mar.

El Cenomaniano Temprano marcó el término de este proceso, y atestiguó la emersión general, acompañada de un ligero plegamiento de las capas, ocasionando emersión y procesos erosivos en la superficie emergida.

En el Turoniano Temprano la región se sumergió nuevamente, en la porción occidental, lo rápido de esta inmersión no permitió la formación de un banco, acumulándose capas de calcilimolita arcillosa con intercalaciones de limolita (*Formación Cuautla*): las tierras emergentes cercanas suministran dicho material clástico. Esta inmersión continuó durante el Turoniano, cambiando gradualmente la sedimentación debido a la aportación cada vez mayor de material clástico. Contemporáneo a este proceso, la parte occidental de México estaba en movimiento ascendente, siendo así blanco fácil de la erosión, mientras que la continua actividad volcánica aportaba también gran cantidad de material clástico.

Durante el Coniaciano, los sedimentos carbonatados disminuyeron considerablemente, aumentando en su lugar el material detrítico, formando capas de arenisca (grauvaca) con interestratos de lutita y de conglomerados de grano

fino que constituyeron la *Formación Mexcala*, éstos se acumularon en aguas profundas donde ocasionaron pulsos de corrientes de turbidez que generaron una alternancia de estratos de materiales terrígenos de diferente grosor y dureza. Este depósito al parecer continuó hasta principios del Maestrichtiano. Posteriormente la región emergió nuevamente debido a una regresión a finales del Cretácico, para no volver a sumergirse.

Periodo Paleogeno-Neogeno

El levantamiento iniciado hacia finales del Cretácico se intensificó en el Paleoceno y culminó en el Eoceno Temprano (*Orogenia Laramide*). Conforme ocurría el plegamiento con su consecuente levantamiento, la erosión se intensificaba sobre las partes más elevadas, provocando al final del Eoceno la remoción parcial de las capas detríticas y calcáreas de la cima de los anticlinales más elevados de la región, hasta descubrir incluso la parte inferior de la *Formación El Doctor*.

El típico fallamiento inverso que acompaña a la *Orogenia Laramide* contrasta con las numerosas fallas normales ocurridas al término del plegamiento compresional a mediados del Eoceno, con la posterior dislocación de la corteza en bloques levantados, hundidos e inclinados; en cuyas fosas se depositó durante el Eoceno Tardío, Oligoceno Medio, el material erosionado que dio lugar a la formación del *Grupo El Morro*, constituido por una secuencia delgada de conglomerado fosilífero, areniscas, limolitas y margas, sedimentos continentales de origen postorogénico que contrastaron con los pulsos de corrientes de turbidez de la *Formación Mexcala*. El color rojizo típico de la matriz pone de manifiesto el intemperismo de las calizas, como origen de este material; estos suelos rojos comúnmente se formaron en terrenos elevados con humedad moderada y vegetación nada exuberante, incapaz de reducir el fierro de los suelos y permitir la infiltración de las aguas al subsuelo, sin el depósito de sales. El suelo rojo producido así tuvo que ser transportado y depositado en un ambiente oxidante, para evitar la reducción del fierro. En relación con los sedimentos del *Grupo El Morro*, éstos se depositaron en depresiones topográficas asociadas a cuencas hidrográficas posiblemente semiáridas, preservando así su color rojizo.

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Debido a que esta región sufrió los efectos de la *Orogenia Laramide*, plegando y fracturando las rocas Mesozoicas, como se puede apreciar cerca de la zona de estudio en la *Formación Mexcala*, estos movimientos trajeron como consecuencia innumerables fracturas y fallas que constituyeron conductos por donde ocurrió el flujo del magma, que se manifestó en forma de derrames lávicos que corrieron a través de cortes transversales y longitudinales, formando cordilleras que seguían los ejes de los plegamientos sufridos durante dicha Orogenia, iniciándose así una larga época de vulcanismo activo que abarcó desde el Oligoceno Tardío hasta el Plioceno Temprano, con la acumulación local de miles de metros cúbicos de rocas volcánicas de composición variable de riolita, andesita y basalto (*Grupo Pachuca*)¹. Esto dio lugar a un nuevo aspecto de la geomorfología de la zona, formando cuencas cerradas separadas por barreras constituidas por estas rocas, estableciendo vasos escalonados que se comunicaron debido a que las depresiones fueron rellenadas por derrames lávicos de gran extensión.

Todos estos acontecimientos tuvieron lugar durante el Mioceno, continuando diferentes fases eruptivas hasta el Cuaternario. Esta actividad volcánica estuvo relacionada con movimientos tectónicos a lo largo de grandes fallas que formaron las prominencias que se pueden apreciar cerca y dentro de la zona de estudio, muy particularmente en los cerros Malinche y Magóni.²

Al parecer, la época de vulcanismo culminó en el Plioceno Temprano, con la intrusión aislada de pequeños diques (basalto-andesítico) y con otra temporada de fallamiento activo, acompañada o seguida de la mineralización metálica en el distrito minero de Pachuca y en otros distritos mineros cercanos.

¹ Jesús Alfredo, Mendoza Escobedo, *Informe trimestral del estudio geohidrológico para determinar la evolución de la calidad química del acuífero que abastece a la Central Termoeléctrica Tula, revisado por Sergio A. Flores Castro*, Comisión Federal de Electricidad, subdirección de construcción, gerencia de ingeniería civil, subgerencia de estudios geológicos, departamento de geohidrología, residencia de estudios geohidrológicos, México, D.F., 1990.

² F. J., Ángeles-Aquino, *Estudio Geológico de Tula, Hidalgo (Zona Arqueológica)*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México, D.F., 1975.

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

A mediados del Plioceno ocurrió una nueva actividad volcánica acumulándose la *Formación San Juan*, que se compone de extravasaciones máficas cuyo emplazamiento ocurrió a través de antiguos centros eruptivos. Esta nueva actividad volcánica formó, al igual que eventos anteriores, cerros elevados separados por cuencas más bajas, de tal modo que la región preservó su considerable relieve con grandes alturas sobre el nivel del mar. Contemporáneo a este evento, el clima se tornó más árido provocando más tarde la acumulación de sedimentos de la *Formación Tarango*, tanto en la cuenca de México, como en la cuenca hidrográfica del río Tula y sus afluentes. Las lavas máficas de la *Formación San Juan* alcanzaron localmente a interestratificarse con dicha formación, cuyos sedimentos clásticos se acumularon en forma de relleno de amplios valles, primero depositándose alrededor de las sierras en forma de abanicos aluviales con intercalación de tobas de grano fino, originadas por erupciones volcánicas contemporáneas. Es seguro que los derrames de lavas máficas causaron la interrupción del desagüe en determinados sitios, provocando así lagos efímeros.

Periodo Cuaternario

El vulcanismo máfico continuó, y a principios del Pleistoceno llegó incluso a obstruir el desagüe hacia el sur de la ciudad de México, formando su actual cuenca endorreica. El resto de la región estuvo expuesta a una erosión activa que removió gran parte de los sedimentos del Plioceno de la *Formación Tarango*.³

Durante el Pleistoceno los acontecimientos geológicos como la erosión y el depósito dieron lugar a una geomorfología caracterizada por un gran valle con pendientes suaves y algunas prominencias. En algunas partes se formaron lagos que recibieron aporte de las corrientes que drenaron el área y que llevaron en solución innumerable cantidad de sales y sedimentos en suspensión procedentes

³Jesús Alfredo Mendoza Escobedo, *op. cit.*

de las rocas más antiguas, que más tarde constituyeron los depósitos lacustres y aluviales que hoy observamos en la superficie plana del valle.⁴

3.1.2 Estratigrafía regional

Mesozoico

Formación El Doctor (Kid)

Esta unidad fue descrita inicialmente por B. W. Wilson en 1955 y Segerstrom en 1961. Su localidad tipo se localiza en el estado de Querétaro y fue subdividida en cuatro facies diferentes conocidas como La Negra, San Joaquín, Socavón y Cerro Ladrón.

En la región la *Formación El Doctor* aflora en el cerro de San Miguel de la Cal y en las cercanías del poblado de Jonacapa, aflora extensamente al sur del valle, formando los cerros de Bomintzhá y Conejos.⁵ Está constituida por calizas marinas que presentan una variación progresiva en su estratificación, textura y estructura, encontrándose intercaladas con dolomías y lutitas. Su textura varía de mudstone a boundstone, de color gris a gris claro, abundante en fósiles.

Sedimentológicamente, estas rocas se acumularon en un ambiente de plataforma por lo que presentan cambios de facies de laguna interna, postarrecife, prearrecife, arrecife y brechas de talud. La facies más importante corresponde a las calizas arrecifales de rudistas, las cuales gradúan hacia la base hasta constituir una brecha de tipo basal completamente masiva. Toda esta secuencia de sedimentos estuvo sujeta a procesos de erosión subaérea durante un cierto tiempo, lo cual dio lugar a la formación de brechas litoclásticas. El desarrollo de los sedimentos suprayacentes se llevó a cabo gracias a las óptimas condiciones del medio para la formación de las calizas propias de aguas someras (biostromas), que tuvo lugar cuando un mar transgresivo ocupó la región.

⁴ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

⁵ Comisión Federal de Electricidad, *Texto geología, 1996.*

La *Formación El Doctor* en su base corresponde principalmente al Albiano, su clima corresponde al Cenomaniano Temprano. Es equivalente a diferentes formaciones del norte y sur de la república como son: Tamaulipas Superior, El Abra, Morelos, Cuesta del Cura, Orizaba, Sierra Madre, etcétera. Su espesor máximo es de aproximadamente 1000 m.⁶

Estas rocas constituyen el basamento de toda la columna estratigráfica con un espesor aproximado de 2000 m. En la parte central del valle, en la zona del volcán Xicuco, se encuentran sepultadas entre 400 y 500 m, donde fueron asimiladas por vulcanismo. En la superficie se observan dislocadas por depósitos basálticos y en sitios como el cerro Bomintzhá, dichos basaltos cubren la cima.⁷

Formación Cuautla

Su localidad tipo está al poniente de Cuautla, Morelos. Fue descrita inicialmente por Carl Fries en 1960. Es correlacionable con la *Formación Soyatal*.

Se encuentra suprayaciendo a la *Formación El Doctor*, aflora en la región en las canteras de las fábricas de cemento Cruz Azul. Está caracterizada por calcarenitas de color gris en estratos potentes. El espesor de estas rocas es variable y no bien definido, debido a que se encuentra cubierta discordantemente por depósitos más jóvenes.

La sedimentología de estas rocas es muy semejante a la de la *Formación El Doctor*, por lo que no es fácil establecer un límite entre ambas formaciones, pero los fósiles como las amonitas *Molti columastica cyathiformes*, los rudistas como *Durania* y gasterópodos como *Nerinéa* dan una edad Turoniano.

⁶ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

⁷ Comisión Federal de Electricidad, *op. cit.*

Formación Mexcala (Kmsx)

Su localidad tipo está en Mexcala, Guerrero, fue descrita por Carl Fries en 1960, consta de una alternancia de calizas arcillosas, lutitas, limolitas y areniscas. Dicha formación solamente se observa en afloramientos aislados y de poca importancia en el sur y suroeste del área de estudio, en el Cerro Blanco y al sur de Bomintzhá.⁸

Los sedimentos terrígenos de la *Formación Mexcala* se presentan intemperizados en colores variables, predominando un color amarillo-naranja en las areniscas. Éstas se observan muy fracturadas, plegadas y alteradas. La posición real de los estratos es muy compleja, por lo cual no se puede definir una secuencia normal de los mismos. Se observa subyaciendo a sedimentos recientes en forma discordante.

La Orogenia Laramide del Paleoceno-Eoceno trajo como consecuencia un intenso plegamiento en estas rocas, debido a diferentes procesos orogénicos que las afectaron posterior a su depósito, fueron erosionadas y alteradas por los agentes del intemperismo.

Las edades establecidas para esta formación son muy variadas, pues algunos autores le atribuyen una edad correspondiente al Santoniano y a la base del Campaniano Inferior, y otros autores consideran que corresponde al Campaniano Tardío y principios del Maestrichtiano, esta discrepancia se debe a la escasez de fauna. Ocasionalmente se encuentran las amonitas *Pericóceras*, *Barroisíceras*, *Otoscaphtes* así como el *Pelecipodo Inoceramus*.⁹

⁸ *Idem.*

⁹ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

Cenozoico

Paleogeno-Neogeno

Grupo El Morro (Tcb)

Este conglomerado calcáreo se compone de detritos subredondeados de rocas calizas cementadas por calcita o caliche, semicompactos, de color gris claro a amarillo. Aflora al sur del valle de Tula-Progreso, en las faldas e inmediaciones del cerro Bomintzhá, cerca de la barda sur de la refinería Miguel Hidalgo. En su mayor parte se encuentra sepultado por las rocas de la *Formación Tarango*. Su espesor varía de 5 a 200 m, en las partes más profundas del valle. Cubre concordantemente a las rocas calizas del basamento (Kid) rellenando las depresiones antiguas. Se encuentra cubierto por las rocas de la *Formación Don Guinyó, San Juan y Tarango*.

Grupo Pachuca (Tomp)

Fue descrita inicialmente por C.D. Hulin, Edwar Wisser y R. W. Choney en 1927. Su localidad tipo se encuentra en la sierra de Pachuca y está constituida por ocho formaciones con un espesor aproximado de 2270 m. En la región aflora en los volcanes de Nopala y Astillero, así como gran parte de la sierra del Xinthé. En general este grupo se encuentra constituido por rocas volcánicas, principalmente de tipo andesítico y dacítico, aunque también existen intercalaciones de riolitas y basaltos. Se encuentran rocas piroclásticas de origen pumicítico que en la región se hallan bajo derrames andesíticos provenientes de los volcanes Nopala y Astillero. En las cercanías del valle se observan las sierras de Loma Taxhuada y Cerro Blanco. Su potencia en conjunto es de más de 2000 m.¹⁰

Una de las fuentes más características de todas éstas rocas estuvo en la actual sierra de Pachuca, la mayor evidencia son las lavas viscosas que no poseen gran extensión, por lo tanto se deduce que hubo varios focos emisores, uno de los cuales se ve cerca de la zona de estudio en la sierra del Xinthé.

¹⁰ Comisión Federal de Electricidad, *op. cit.*

La edad establecida para este grupo corresponde al Oligoceno Superior y Mioceno; es correlacionable con otras rocas de la misma edad en otras regiones de México.¹¹

Formación Don Guinyó (Tdg)

Se constituye de tobas, brechas e ignimbritas de composición riolítica y dacítica con lentes horizontales de obsidiana. Aflora en el volcán Xicuco y al este del área de estudio. Su espesor real en el sitio de estudio es indeterminado, ya que la mayor parte se encuentra sepultada por las tobas de la *Formación Tarango*.

Formación San Juan (Tpsj)

Consiste de tobas, basaltos y aglomerados. Afloran en los cerros La Palma, Xicuco y Bomintzhá. Estas rocas intrusionan y sobreyacen a calizas cretácicas de la *Formación El Doctor* en el cerro de La Palma y a la *Formación Don Guinyó* en el cerro Xicuco. El contacto superior lo constituyen las tobas de la *Formación Tarango*. Su espesor es muy variable en función a su posición topográfica, y va de 10 a 80 m o más.¹²

Formación Tarango (Tpt)

Fue descrita por Bryan en 1948. Su localidad tipo está en la barranca de Tarango, en Mixcoac México. Esta misma formación aflora en el estado de Hidalgo.

Los materiales que la componen son de tipo clástico, como gravas, arenas, limos y arcillas, así como cenizas volcánicas acumuladas en forma de rellenos sobre una gran superficie de erosión, sobre rocas Cretácicas y Paleógenas-Neógenas. En su mayoría estos materiales fueron acarreados por las corrientes superficiales que drenaron el área, dando lugar a la formación de pequeñas depresiones lacustres en las que se depositaron las cenizas, tobas fracturadas, pumicita y lahares. La edad establecida para esta formación corresponde al Plioceno Superior o

¹¹ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

¹² Comisión Federal de Electricidad, *op. cit.*

posiblemente la base del Pleistoceno, presenta un espesor de aproximadamente 400 m.¹³

Aflora en prácticamente todo el valle de Tula-Progreso encontrándose cubierta en varios sitios por suelo agrícola (Qre) o derrames de basaltos (Qb) en algunos lugares al occidente de dicho valle. Este paquete vulcanosedimenario puede dividirse en dos miembros dadas sus características. El miembro (Tpt1) es el inferior y se compone de tobas lacustres arcillo-arenosas, tienen un espesor promedio de 200 m. El segundo miembro (Tpt2) sobreyace discordante al anterior y se constituye de tobas areno-arcillosas con intercalaciones de derrames de basaltos. En su conjunto presenta un espesor promedio de 220 m.¹⁴

Cuaternario

Los sedimentos correspondientes a este periodo se encuentran distribuidos en toda la zona de estudio, formando diferentes suelos con distinta composición así como abanicos aluviales y zonas de inundación; que dan lugar a unidades posiblemente correlacionables con las formaciones Tacubaya y Becerra en el Estado de México.

Los materiales que componen estas unidades son heterogéneos generalmente terrígenos, como arcillas, arenas y gravas, aunque también se observan piroclásticos mezclados, de diferentes composiciones que fueron acarreados por las corrientes que drenaron el área, formando estratos levemente consolidados, de espesores variables que forman parte del suelo vegetal.¹⁵

Basaltos Cuaternarios (Qb)

Consisten en basaltos vesiculares de augita, de color gris claro, compactos y estructura vesicular desarrollada. Presentan espesores variables desde 0.5 m hasta 20.0 m en sus partes más potentes. Afloran en las inmediaciones de la presa Endhó al oeste del área así como también en la parte norte del cauce del

¹³ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

¹⁴ Comisión Federal de Electricidad, *op. cit.*

¹⁵ F. J., Ángeles-Aquino, *op. cit.*

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Río Salado y río Tula, al norte de la población de Tlahuelilpan en el cerro Mesa la Mina.

Aluviones (Qa)

Se constituyen de gravas, arena y limos y sus afloramientos están restringidos a los lechos de los ríos e intercalados en la *Formación Tarango*, en los paleocanales y zonas de desbordo.

Suelo residual y agrícola (Qre)

Se compone de detritos finos a gruesos productos de la erosión y arrastre de las rocas que afloran circundantes al valle. Cubre la porción superficial del valle en general, alcanzando espesores de hasta 1.5 m en las partes más profundas hasta desaparecer al pie de los cerros.¹⁶

Eon	Era	Período	Época	Fase	Edad (Ma) actuales	Nombre de la formación	Litología	Permeabilidad
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario	Holoceno		0.0117	ALUVIÓN	Gr: Suelos residuales Dol: Dolomita	Semipermeable-Permeable
				Superior	0.126	DERRAMES BASÁLTICOS	Qb: Basaltos	Impermeable- Permeable **
				Medio	0.781			
				Calabriense	1.806			
				Gelasense	2.588			
			Plioceno	3.800	FM. TARANGO	Tp2: Tobas arenosas Tj11: Tobas arcillosas Tz: Basaltos	Permeable- Impermeable *	
		Neógeno		Zandriense	5.333	FM. SAN JUAN		Impermeable-Permeable *
				Messiniense	7.246	FM. DON GUINYO	Tdg: Igníferas	Semipermeable
				Tortonense	11.62			
				Serravallense	13.82			
			Langhiense	15.97				
			Burdigaliense	20.44				
			Aquitaniense	23.03				
			Oligoceno	28.1	FM. PACHUCA	Tomp: Volcánicos Indiferenciados	Impermeable- Permeable **	
			Rupeliense	33.9	GRUPO EL MORRO	Tcb: Conglomerado calcáreo	Semipermeable	
	Paleógeno			Príabonense				38.0
			Bartoniense	41.3				
			Luteciense	47.8				
	Paleoceno		Ypresiense	56.0				
			Thanetiense	59.2				
			Selandiense	61.6				
			Daniense	66.0				
			Maastrichtiense	72.1 ± 0.2	FM. MEXCALA	Kris: Calizas / Lutitas	Impermeable	
Mesozoico		Cretácico	Superior	Campaniense	83.6 ± 0.2	FM. CUAUTLA		Impermeable
	Santonense			89.3 ± 0.5				
	Coniacense			89.8 ± 0.3				
	Turonense			93.9				
			Cenomaniense	100.5	FM. EL DOCTOR	Kid: Calizas	Impermeable- Permeable **	
	Inferior		Albiense	-113.0				

* El grado de permeabilidad depende del grado de fracturamiento (porosidad secundaria).
 ** El grado de permeabilidad depende del porcentaje de arcilla.

Figura 3. Columna Cronoestratigráfica

¹⁶ Comisión Federal de Electricidad, *op. cit.*

3.2 CLIMATOLOGÍA

La valoración hidrogeológica de una región implica el estudio de los factores que controlan la distribución de los recursos hídricos, entre los que destaca el clima.

Aparte del río Tula y el Río Salado, el valle de Tula no es una región rica en el aspecto hidrológico. No obstante, esta hidrología natural se ha modificado fuertemente por la red de canales y drenajes. A diferencia de otras regiones, la principal recarga del acuífero no se realiza a partir del agua de lluvia o de ríos, sino del agua que se infiltra por el riego y a través de la red de canales sin revestir.

El periodo de lluvias se lleva a cabo durante el verano. Para analizar dicha información se utilizaron los datos del Servicio Meteorológico Nacional y cinco estaciones. Las estaciones núm. 13040 y núm. 13092 se encuentran ubicadas en Tula de Allende, la estación núm. 13010 en Atengo, estación núm. 13049 entre Tula de Allende, Atitalaquia, Teocalco y Bomintzhá y finalmente la estación núm. 13035, en Tezontepec de Aldama.

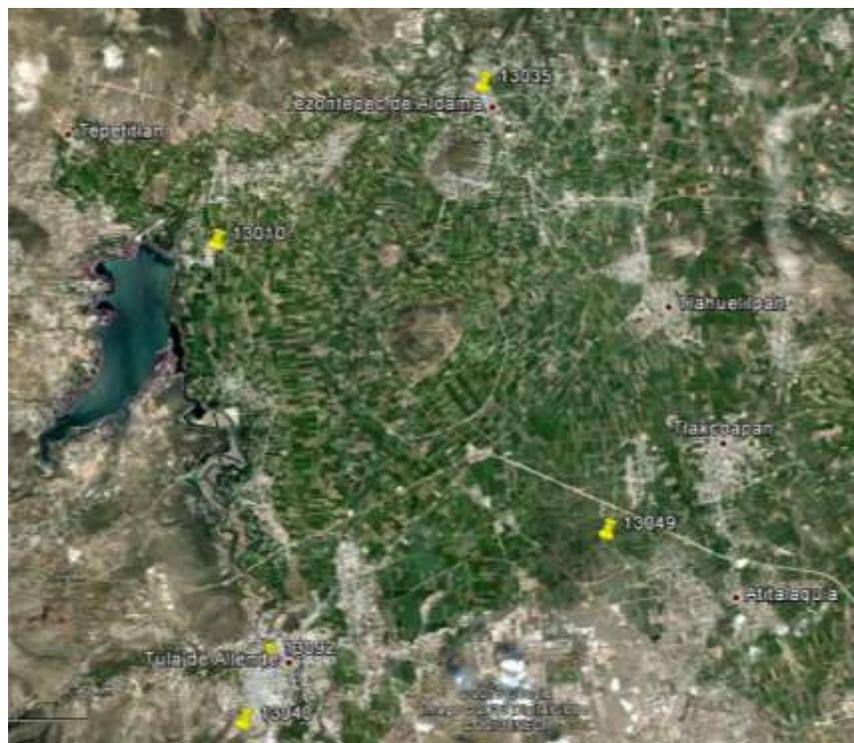


Figura 3.1. Imagen tomada de Google Earth. Muestra los marcadores de las estaciones climatológicas y los nombres de los municipios

Únicamente dos de las cinco estaciones permanecen en servicio en la actualidad (núm. 13092 y la núm. 13035). Se utilizaron los datos de ambas estaciones para tener una base de datos completa de la climatología desde el 1 de enero de 1950 hasta el 31 de enero de 2010, dicha información se analizó por medio de gráficas. Las variables que se analizaron fueron precipitación, temperatura y evaporación.

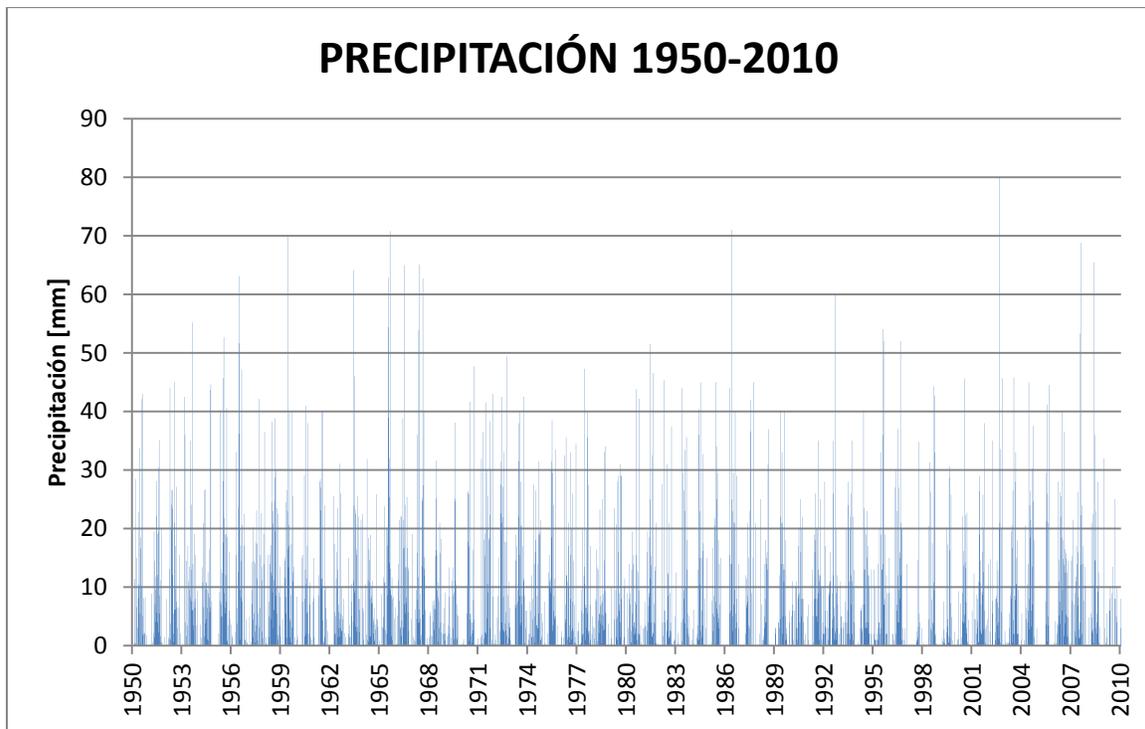


Figura 3.2. Precipitación diaria de 1950 a 2010

En la figura 3.2 se muestra simultáneamente la temporada de lluvias y el promedio de milímetros que llueve en la región al día, el cual corresponde en promedio a 40 mm. Destacan 1991 y 2003 con el mínimo y el máximo promedio diario respectivamente.

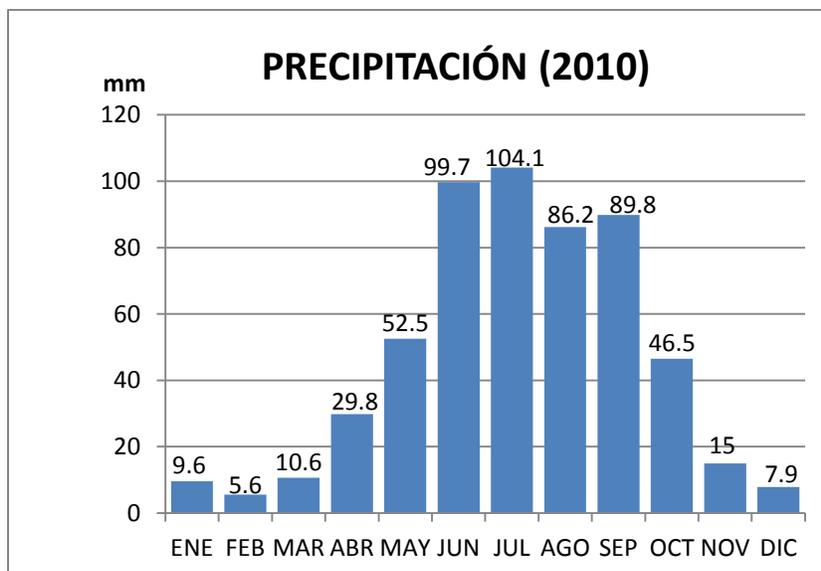


Figura 3.3. Precipitación mensual de 2010

Para el año 2010 (ver figura 3.3) se analizó la precipitación correspondiente a cada mes en la zona de estudio. Se observó que los meses de junio, julio, agosto y septiembre presentaron las mayores lluvias, con valores promedio de 95 mm/mes. El total de milímetros que precipitó en 2010 fue de 562, aunque otros años ha llegado hasta 1000 mm.

Posteriormente se analizó anualmente el total de milímetros precipitados en la figura 3.4.

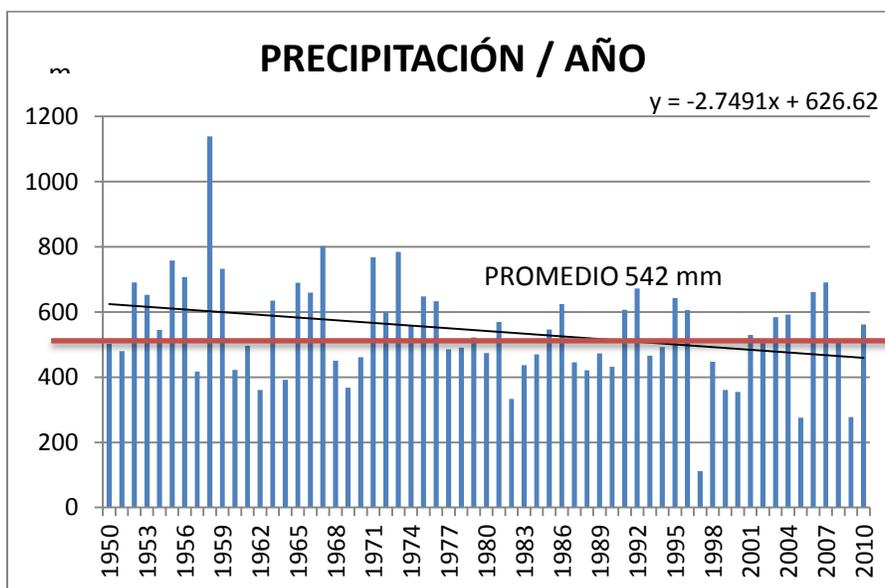


Figura 3.4. Precipitación total anual de 1950 a 2010

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la figura 3.4 se muestra la precipitación total anual en milímetros, cuyo promedio es de 542 mm. Se trazó una línea de tendencia (color negro), en la cual se observa que la pendiente no es despreciable, lo que indica un posible decremento en la cantidad de lluvia anual. Esto se debe a que en los primeros 10 años de la figura, se tienen 6 valores que superan los 600 mm y los demás se ubican arriba de 400 mm. Por otra parte, si se analizan los últimos 10 años sólo 2 valores superan los 600 mm y los demás están debajo de los 400 mm.

Otro concepto que se estudia en la climatología es la temperatura; y el promedio anual normal en la zona de estudio es de 20 °C.

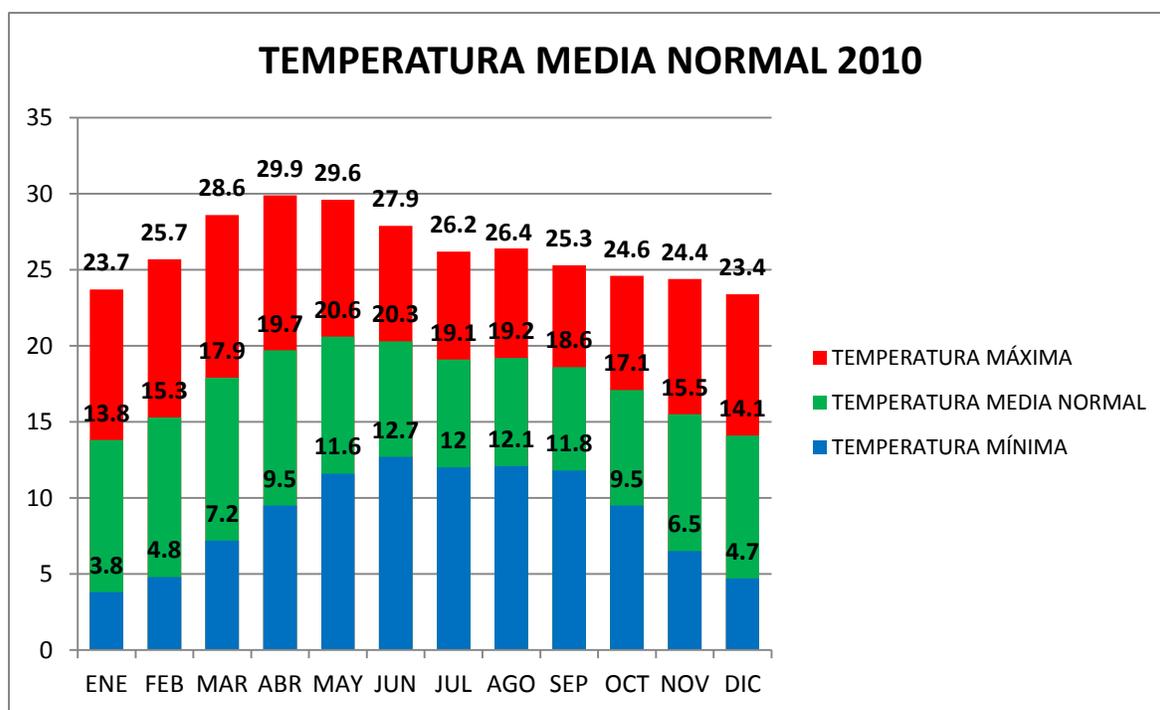


Figura 3.5. Temperatura máxima, mínima y promedio de 2010

Los datos que se presentan en la figura 3.5 corresponden a los valores de temperatura mínima normal y temperatura máxima normal. La temperatura media normal se obtuvo a partir del promedio de ambas. Se observa que ninguna sobrepasa los 30 °C para el caso de la temperatura máxima, y ninguna baja de los 3 °C para la temperatura mínima. Los meses más calurosos son marzo, abril, mayo y junio (primavera), época de estiaje.

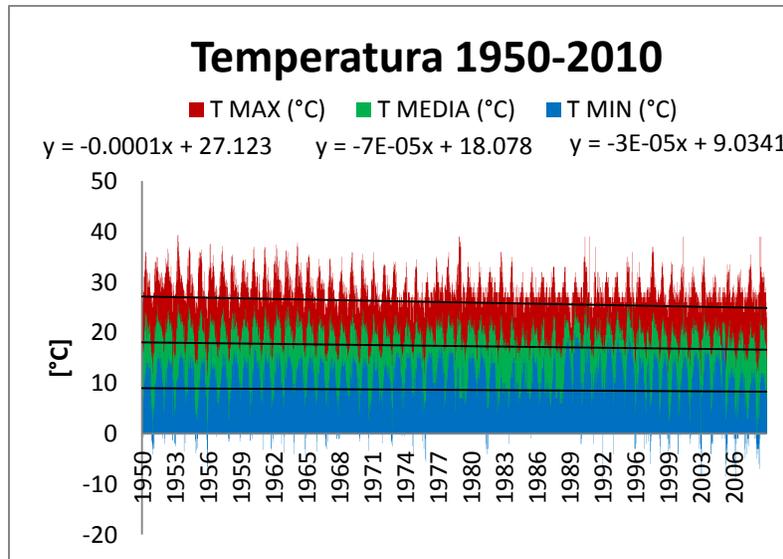


Figura 3.6. Temperatura máxima, media y mínima desde 1950 a 2010

En la figura 3.6 se representa la temperatura máxima, mínima y el promedio entre ellas de 1950 a 2010. Se colocaron líneas de tendencia, en las cuales se observa que las pendientes son negativas, lo que indica que la temperatura disminuyó, sin embargo el valor es despreciable, esto quiere decir que a través de los años y a pesar del calentamiento global la temperatura no ha sufrido algún cambio drástico.

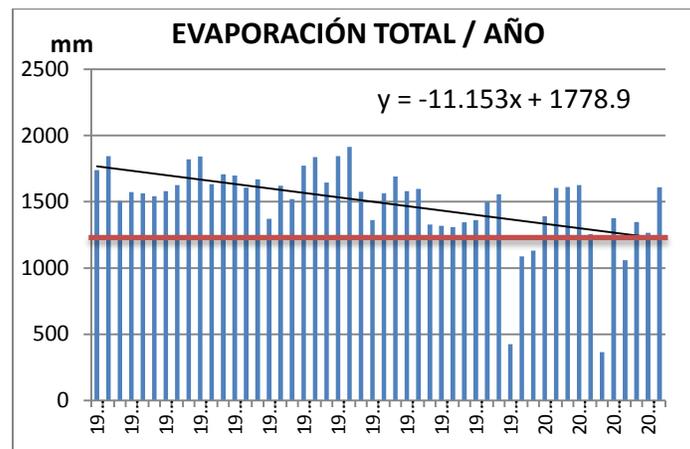


Figura 3.7. Evaporación total por año de 1961 a 2010

En la figura 3.7 se representa la evaporación total anual de 1961 a 2010; se observa que en los primeros años los datos se mantuvieron en promedio por encima de los 1500 mm/año, mientras que en los últimos 13 años (1997-2010)

variaron notablemente hasta llegar a valores inferiores a los 500 mm/año. Así, la evaporación total por año promedio fue de 1225 mm/año (línea roja).

Después de analizar los datos de precipitación y temperatura, se deduce que la zona de estudio es una región seca, semi árida, con una precipitación anual de 542 mm/año y una temperatura anual de 20°C. La temperatura más alta registrada fue de 40°C entre 1991 y 1992, y la mínima de -10°C en 2005.

Como dato final se calculó la Evapotranspiración Real, por medio de la Ecuación de Turc, 1961.

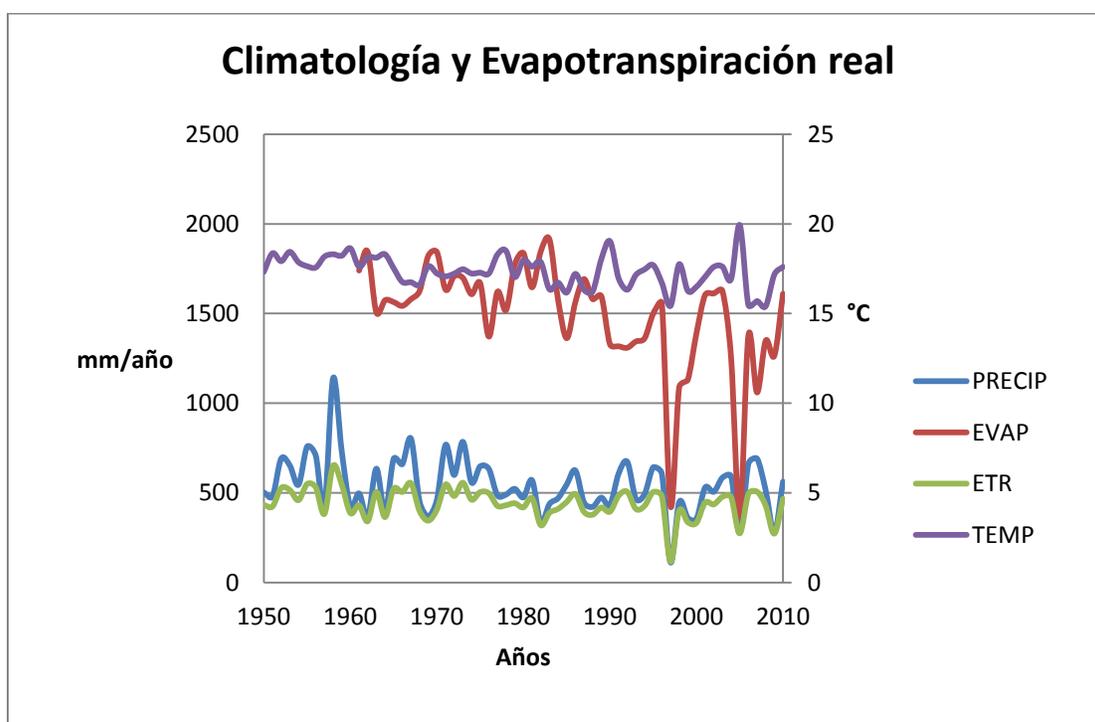


Figura 3.8. Climatológica (precipitación, temperatura y evaporación) y de evapotranspiración

La evapotranspiración real obedece el mismo patrón que la precipitación. Al calcular el porcentaje de la evapotranspiración con respecto a la precipitación, se obtiene un resultado que oscila entre 100 y 80%, lo cual indica que prácticamente todo lo que llueve se evapora. No obstante, el nivel freático se mantiene sin algún cambio. Lo anterior sugiere que la recarga del acuífero no proviene de la lluvia, sino de alguna otra fuente.

3.3 HIDROLOGÍA

3.3.1 Hidrología superficial

La zona de estudio pertenece al distrito de riego 03, ubicado en la provincia de la Mesa Central de México. Ésta se caracteriza por sus planicies extensas y la intervención de algunas montañas con distintos rangos de altura. El distrito de riego se sitúa en el suroeste del estado de Hidalgo y colinda al sur con la ciudad de México.

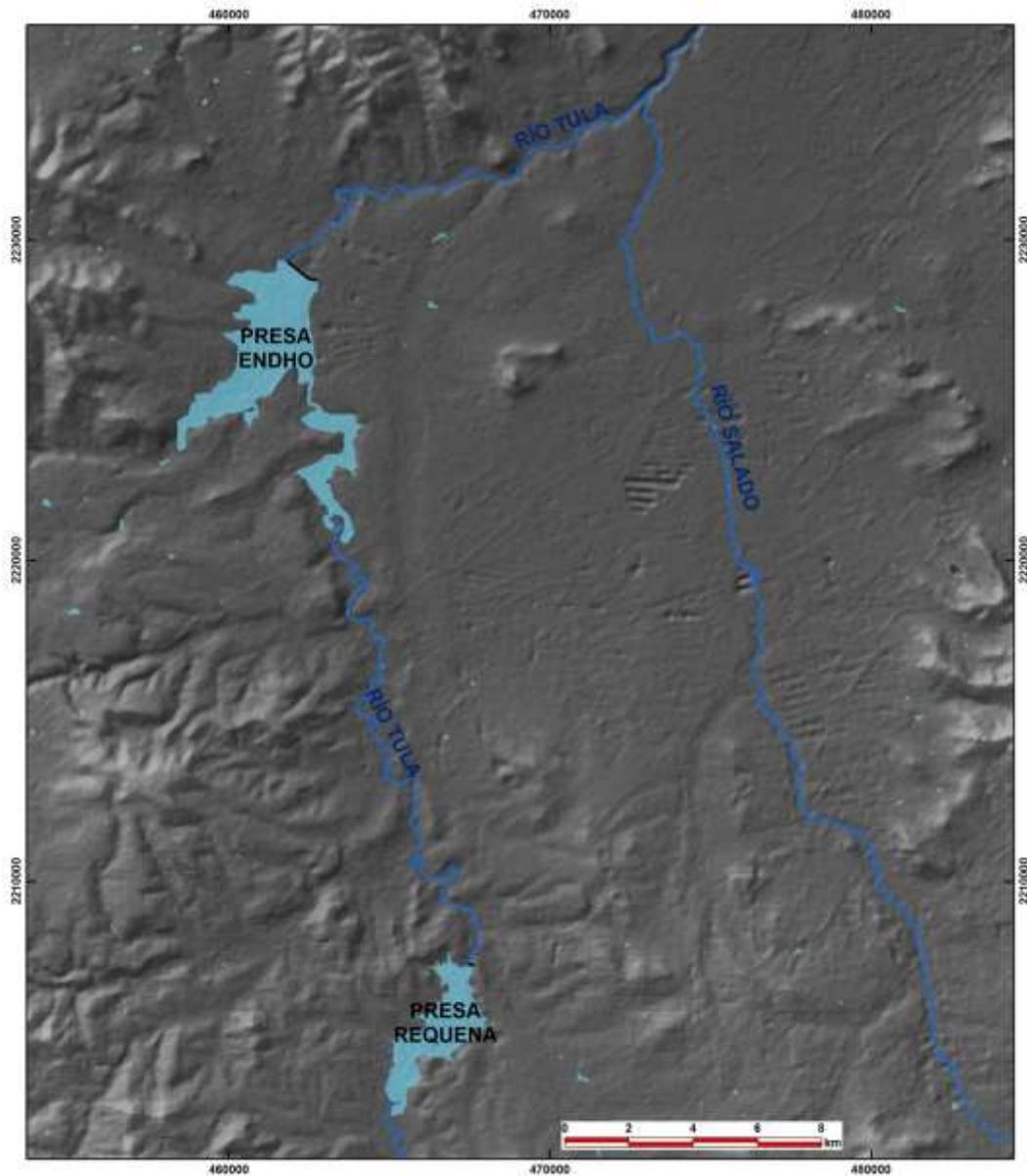


Figura 3.9. Hidrografía del área de estudio

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

Las montañas que lo rodean alcanzan una altitud de hasta 2500 msnm. Hacia el norte se encuentra el distrito de riego 100 (Alfajayucan), que también recibe las aguas residuales de la ciudad de México.

El distrito de riego se ubica en un bajo estructural de 5 a 15 km de ancho y 30 km de largo. El drenaje principal del valle es hacia el norte a través de los ríos Tula y Actopan; que forman parte de la cuenca Moctezuma-Pánuco. En el suroeste del valle el drenaje se lleva a cabo por el río Tepeji, que recibe agua fresca de las presas Taxhimay y Requena. Después de pasar por la presa Endhó, el río es nombrado como río Tula, el cual subsecuentemente se une con el Río Salado para abandonar el valle hacia la parte norte. Al oriente del valle el drenaje se lleva a cabo por el río Actopan, que desciende de las montañas que se encuentran alrededor de Pachuca y Chicavasco, el cual une a Tula e Ixmiquilpan. El río Tula, al unirse con los ríos San Juan del Río y Hondo, se convierte en el río Moctezuma.

3.3.2 Hidrología subterránea

La zona de estudio se caracteriza por recibir las aguas residuales de la ciudad de México, las cuales a través del riego se encargan de recargar en forma incidental el acuífero del valle de Tula. Este fenómeno ha provocado una recarga desmesurada, y como consecuencia varios manantiales de agua de recién ingreso han surgido inesperadamente, incluso en zonas áridas, siendo éstos parte del sistema de flujo de agua fría. Como parte de un segundo sistema de flujo, se tiene a los manantiales de agua caliente, los cuales pueden alcanzar temperaturas que llegan a los 92° C (aprovechados para producir energía), algunos poseen columnas de vapor que se elevan hasta 120 metros de altura (Pathe) y otros tienen temperaturas que van de los 30 a los 58° C (Panuaya, El Tephe, Tzindejéh, Taxidhó, Gandho, Vidó, Vito, Uxdejhé, La Cañada, Pathecito y Chichimequillas).

La hidrogeología se controla ampliamente por el tipo de roca, fallas geológicas, permeabilidad y porosidad de las mismas. Estos factores dieron lugar a una secuencia de acuicludos y acuíferos en diferentes zonas. En la zona de estudio se

encontraron tres formaciones con potencial hidrogeológico, las cuales se describen más adelante.¹⁷

Unidades hidrogeológicas

Unidades permeables

Dentro de estas unidades se agrupan las rocas y rellenos de sedimentos detríticos que presentan porosidad e intercomunicación entre poro y poro, y que finalmente son capaces de transmitir cualquier fluido a través de ellas.

La mayor parte de las rocas presentes en el área son rocas ígneas extrusivas, de las cuales sólo algunas (principalmente basaltos) presentan porosidad primaria, que consiste en una estructura vesicular.¹⁸ Los basaltos del Cuaternario y del Paleógeno-Neógeno, tal es el caso de los pertenecientes a la *Formación Tarango* (miembro Tpt2) y algunos derrames de la *Formación San Juan*, forman el acuífero más importante en el distrito de riego; son la principal fuente de agua subterránea. Estas rocas poseen una permeabilidad moderada, de acuerdo a los caudales de los pozos en ellas, asociada con el fallamiento y fracturamiento de las rocas, además de presentar una resistividad de 27 a 166 Ω .m. Las unidades son de espesor variable y están intercaladas con depósitos menos permeables, formando un sistema multiacuífero. Cuando esta formación aflora o se encuentra cerca de la superficie el acuífero se comporta como libre, cuando está a profundidad es normalmente semiconfinado.

Una de las fuentes importantes de agua subterránea la constituyen los sedimentos de la *Formación Tarango* (miembro Tpt2). Esta secuencia tiene un espesor considerable, sobre todo el valle, y mientras el tamaño del sedimento es mayor la porosidad efectiva (*intergranular permeability*) es de moderada a alta. De igual

¹⁷ Cna, Bgs, Lshtm and Ub, *Effects os wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State*, BGS Technical Report WC/98/42, final report, Mexico, November 1998.

¹⁸ R. Rocha, *Estudio preliminar geohidrológico del Valle de Tula, Edo. De Hidalgo: México, D.F.*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, 1983.

forma hay intercalaciones con permeabilidad baja de basaltos sin fracturar o lentes de arcillas. Debido al tamaño de los lentes arcillosos, esta formación se considera de baja transmisividad. Este acuífero es generalmente libre en situaciones someras y semiconfinado a profundidad. Una de las fuentes potenciales de agua subterránea se presenta en los sedimentos gruesos de la secuencia de aluviones.

Existe la posibilidad de encontrar el recurso hídrico también en las rocas sedimentarias marinas de la *Formación El Doctor* (calizas), que se ubican a gran profundidad, éstas poseen porosidad secundaria debido al alto grado de fracturamiento que presentan, por lo que se consideran permeables. El rango de resistividad para esta unidad varía de 84 a 1165 Ω .m. Las características hidráulicas de este acuífero no están bien definidas debido al número tan limitado de pozos que se han perforado. Algunos afloramientos de la caliza *El Doctor* poseen una alta permeabilidad que posiblemente sea resultado de la disolución. La transmisividad es muy baja, en donde se presentan secuencias arcillosas.¹⁹

Otro factor de permeabilidad lo constituye la alteración de las rocas extrusivas (*Basaltos Cuaternarios*), debido a que en la zona existen varios manantiales, (algunos termales en la zona de Tezontepec de Aldama). Se infiere que las rocas basálticas donde existen estos manantiales se encuentran con alteración hidrotermal, considerando otro factor importante en la existencia de un buen acuífero en las zonas afectadas por esta alteración.

Los aluviones son una unidad que se considera permeable cuando se compone de gravas gruesa empacadas también en granulares.

Unidades semipermeables

Se han considerado dentro de este grupo a las rocas y sedimentos que presentan porosidad en bajo grado y baja permeabilidad. Dentro del área de estudio se valoró que las unidades semipermeables están formadas por las rocas basálticas y andesíticas pertenecientes al *Grupo Pachuca*, a la *Formación San Juan* y a las tobas e ignimbritas de la *Formación Don Guinyó*, las cuales se encuentran

¹⁹ Cna, Bgs, Lshtm and Ub, *op. cit.*

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

fracturadas y alteradas, funcionando como áreas de recarga permitiendo la circulación del agua infiltrada hacia la zona de saturación. Los sedimentos no consolidados de tamaño mediano a fino como algunos horizontes de arenas intercalados con arcillas pertenecientes al miembro tobáceo de la *Formación Tarango*, también se consideran semipermeables y poseen una resistividad de 10 a 44 Ω .m.

Los aluviones se consideran semipermeables cuando abundan limos y arenas. El suelo residual y agrícola es una unidad semipermeable debido a la cohesión de las arcillas que lo componen. Ambas unidades tienen una resistividad que varía de 5 a 78 Ω .m.

Unidades impermeables

En esta unidad se agruparon las rocas y sedimentos que no poseen porosidad o en caso de tenerla los poros no se encuentran interconectados, siendo nula la permeabilidad. Las rocas impermeables presentes en el área son las pertenecientes a la *Formación Mexcala*, dadas sus características litológicas, además de tener bajo grado de fracturamiento y una resistividad de 84 a 302 Ω .m. También se consideran impermeables las rocas andesíticas y riolíticas del *Grupo Pachuca* por su carácter compacto y en ocasiones en estado sano, y algunos basaltos de la *Formación San Juan* y derrames cuaternarios, también en estado sano. Las arcillas y tobas presentes en el área, de la *Formación Tarango* (miembro arcilloso, Tpt1), son de carácter impermeable, y se consideraron como capa sello, permitiendo la formación del acuífero, su resistividad varía de 2 a 6 Ω .m.

Piezometría

Los aprovechamientos de agua subterránea tales como pozos, norias y manantiales, constituyen los puntos a través de los cuales es factible obtener datos sobre las condiciones de los acuíferos; los cuales están distribuidos en

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

forma irregular dentro de la zona, dando un total de 45 pozos, correspondientes a:²⁰

Pozos de la CFE	14
Pozos de PEMEX	11
Pozos particulares y SARH	20
T O T A L	45

A pesar de la distribución tan complicada del acuífero, debido a la complejidad de la geología local y regional del Valle del Mezquital, es posible definir coherentemente el flujo subterráneo regional basado en datos de monitoreo. El modelo conceptual sugiere la existencia histórica de dos direcciones de flujo, influenciadas por la litología y la geología estructural. Una se dirige de sur a norte hacia el río Tula y la segunda va desde la zona media del área de estudio hacia el noreste (valle de Actopan).

En distintas zonas del valle existen diferencias en el flujo hidráulico, así como en la profundidad, esto indica una secuencia de acuíferos intercalados con acuicludos. Como consecuencia se tienen gradientes hidráulicos muy pronunciados en distancias muy cortas. En algunos casos el nivel estático puede variar hasta 30 metros en un radio de 10 metros a la redonda.²¹

²⁰ R. Rocha, *op. cit.*

²¹ Cna, Bgs, Lshtm and Ub, *op. cit.*

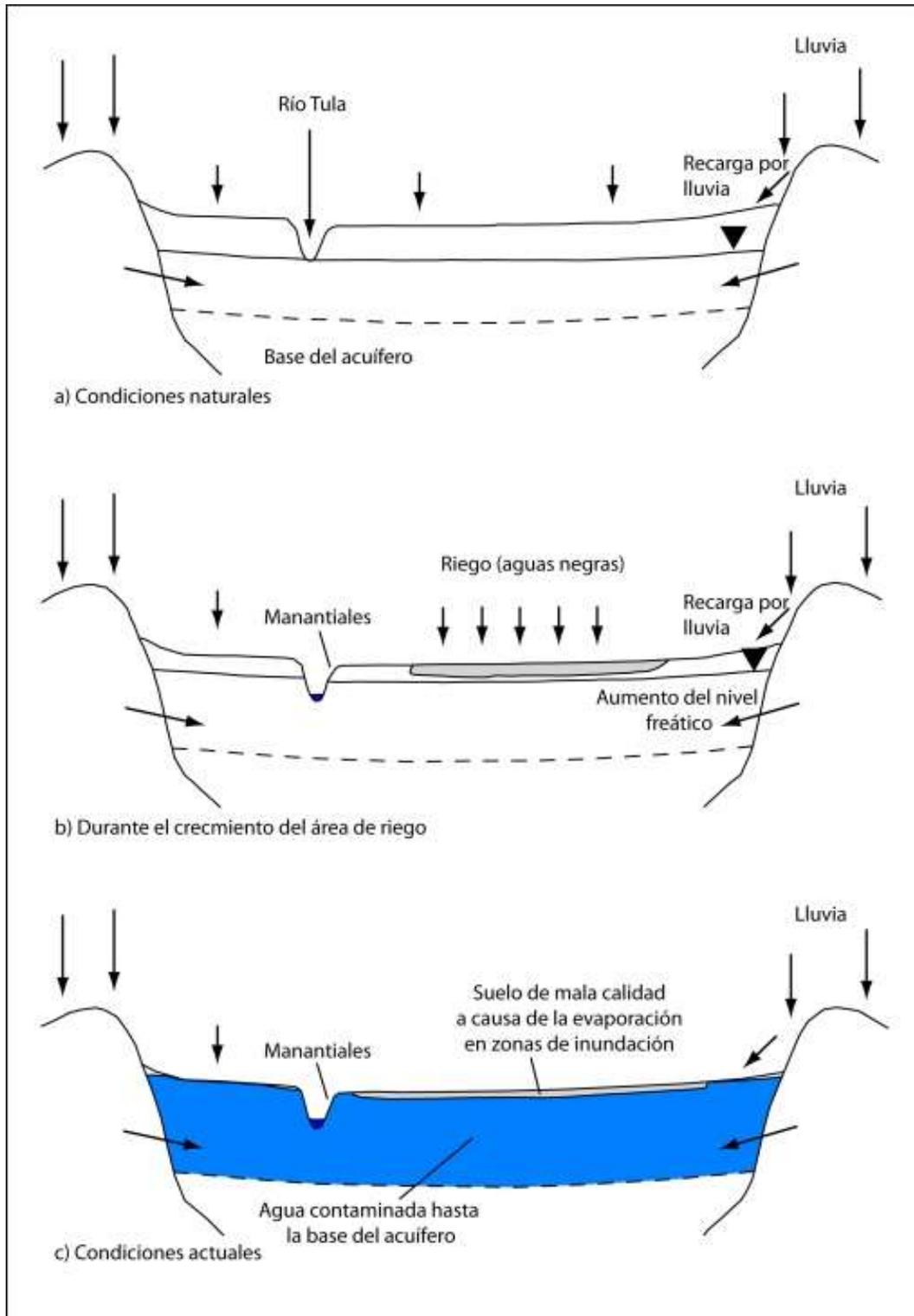


Figura 3.10. Modelo conceptual de la evolución hidrogeológica del acuífero del Valle del Mezquital²²

²² *Idem.*

CAPÍTULO 3. GEOLOGÍA E HIDROLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la figura 3.10, inciso a, se pueden observar las condiciones naturales a las cuales estaba expuesto el acuífero antes del riego, mismas que consistían en una recarga proveniente de la precipitación y un nivel estático profundo. El excesivo y prolongado riego con aguas residuales en los últimos 100 años modificó completamente el flujo subterráneo y la recarga, generando consecuentemente un nuevo acuífero somero (figura 3.10, inciso b).

Debido a los cambios sufridos por el acuífero, se provocó un mayor almacenamiento y consecuentemente el nivel estático se elevó, acompañado por la presencia de varios manantiales (figura 3.10, inciso b). La mayoría de éstos se encuentran en la orilla del río Tula, por ejemplo *El Ojito* que se utiliza con propósitos de recreación. Otros, como el de Cerro Colorado, en el poblado con el mismo nombre, al este de Tlahuelilpan son usados como suministro de agua potable, este manantial tiene una descarga aproximada de 600 l/s.

En algunos lugares los rasgos estructurales y la topografía generaron la presencia de manantiales, como los ubicados en el valle de Tula y Cerro Colorado, y en otros casos los niveles estáticos alcanzaron la superficie (llanuras de inundación). En algunas áreas como San Salvador, Mangas y Tlahuelilpan la evaporación directa de las zonas inundadas produjo un incremento de la salinidad del agua superficial, así como el fenómeno de artesianismo (figura 3.10., inciso c).²³

²³ *Idem.*

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

La presente tesis contempla la evaluación de las fuentes de agua subterránea que abastecen al valle de Tula, a través de un análisis geohidrológico que brinde un mejor panorama del acuífero en cuestión. Para ello se realizaron las siguientes actividades:

4.1. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La recopilación consistió en encontrar artículos científicos, libros, tesis, mapas, cortes litológicos y parámetros hidráulicos que se refieren al área de estudio, posteriormente se clasificaron y analizaron para extraer información importante.

Con esta información se formó una base de datos en Excel para llevar un control del número de documentos recopilados. Entre los datos que se extrajeron de éstos son: título del estudio, autores, año, país en el que se aplicó el estudio y revista o publicación.

Se recopilaron:

- 14 Artículos científicos de las revistas: DYNA, Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Environmental International, Chemosphere, Microchemical Journal, Environmental Pollution, Engineering Geology, University of California Agriculture and Natural Resources, Water Science and Technology
- Cuatro tesis de licenciatura
- 11 tesis de maestría
- Tres reportes técnicos de MARENA, Comisión Nacional del Agua y Department for International Development
- Un libro de Journal of Environmental Engineering
- Una normativa de protección de la calidad del agua subterránea
- Tres mapas geológicos (INEGI, Servicio Geológico Mexicano y Vázquez-Palomera, 1996)
- 14 valores de transmisividad provenientes de aforos originales

- 27 valores de transmisividad provenientes de pruebas de bombeo de larga duración
- 15 valores de coeficiente de almacenamiento
- Datos de caudales instantáneos de 1980, 1989, 1996, 1999, 2000, 2004, 2006 y 2008 para el sistema 1, y datos de 1996, 1999, 2000, 2004, 2006 y 2008 para el sistema 2.
- Información litológica de 45 pozos
- Datos constructivos de 45 pozos
- Sondeos eléctricos verticales

La base de datos piezométrica incluye el nombre del pozo, coordenadas XY, elevación y la profundidad al nivel estático (PNE) de los años 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010 por mes. Cabe señalar que no en todos los años se obtuvieron mediciones de los 12 meses, y en algunos casos se llegaron a obtener hasta tres mediciones en un sólo mes.

Para este trabajo se utilizó una base piezométrica en formato *kmz* (anexo 1), debido a que las coordenadas de los pozos de la base de datos concuerdan con la imagen de Google Earth. La comprobación de la ubicación de los pozos de la base del *kmz* con la imagen satelital se hizo valiéndose de la herramienta *Street View*, y en los casos donde no fue posible se interpretó la imagen satelital del Google Earth.

Para facilidad en el manejo de la base piezométrica en el SIG, se agregó el campo *Cve_Temp* que indica una clave temporal para tener una mejor identificación de cada pozo, puesto que algunos nombres se repiten. De igual forma, se asignó el valor -9999 a los campos donde no se contó con una medición de PNE; cabe señalar que este valor no representa una PNE igual a 0.

4.2 VERIFICACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.2.1 Verificación geológica

Durante la campaña de campo se realizaron verificaciones geológicas en distintos puntos del área de estudio para corroborar la litología y contactos geológicos mostrados en el mapa de Vázquez-Palomera.¹ (Los puntos visitados se enlistan a continuación y se muestran detalladamente en el anexo 1).

PUNTO VERIFICADO	COORDENADAS	LITOLOGÍA	FORMACIÓN
PVG-1	X: 14Q 475510 mE Y: 2214156 mN Z: 2182 msnm	Caliza fosilífera	Fm. El Doctor
PVG-2	X: 14Q 477732 mE Y: 2213814 mN Z: 2124 msnm	Toba areno-arcillosa	Fm. Tarango
PVG-3		Andesitas	Fm. Pachuca
PVG-4	X: 14Q 471476 mE Y: 2233461 mN Z: 1980 msnm	Basaltos y tobas areno-arcillosas	Basaltos cuaternarios y Fm. Tarango
PVG-5	X: 14Q 471227 mE Y: 2233420 mN	Basaltos	Basaltos cuaternarios

Tabla 4. Puntos de verificación geológica

Durante la verificación se realizaron tomas de datos estructurales, con apoyo de una brújula Brunton y un GPS marca GARMIN modelo HGPS de Alta sensibilidad (H).

¹ Vázquez, Palomera, "Mapa geológico de la región", Comisión Federal de Electricidad, Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Estudios Geológicos, Departamento de Geohidrología, 1996.

4.2.2 Puntos de verificación de suelo

El estudio de suelo en esta tesis es importante debido a que en el valle de Tula éste funciona como filtro de las aguas residuales, permitiendo que el agua que se infiltra al acuífero sea de mejor calidad.

Se realizó una verificación de suelos (anexo 1) para comprender mejor su composición y corroborar su existencia, como lo indica la carta edafológica del INEGI. Estos puntos se muestran a continuación:

PUNTO VERIFICADO	COORDENADAS	TIPO DE SUELO
PVS-1	X: 14Q 479227 mE Y: 2214977 mN Z: 2168 msnm	Rendzina
PVS-2	X: 14Q 479935 mE Y: 2217405 mN Z: 2106 msnm	Rendzina
PVS-3	X: 14Q 473133 mE Y: 2217151 mN Z: 2132 msnm	Rendzina
PVS-4	X: 464885 mE Y: 2232715 mN Z: 2084 msnm	Feozem

Tabla 4.1 Puntos de verificación de suelo

4.3 VERIFICACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

4.3.1 Verificación hidrogeológica

Se realizaron dos jornadas de campo, con una duración de dos semanas, durante las cuales se efectuó el censo de 10 captaciones (pozos, manantiales y norias) para complementar la base de datos previamente capturada. Para medir la profundidad al nivel estático Se utilizó una sonda *Solinst Interface Meter* de 300

metros de longitud (figura 4) si la construcción del pozo lo permitía. Se utilizó una sonda electrónica marca HGE cuando se complicó introducir el electrodo (los datos se muestran en el anexo 1).



Figura 4. Sonda Solinst.

4.3.2 Pruebas de bombeo y recuperación

En esta campaña de campo se llevaron a cabo siete pruebas de bombeo y dos de recuperación que se enlistan en el anexo 1. Cabe mencionar que todos los pozos en donde se realizaron las pruebas son de agua potable. Las pruebas de recuperación tuvieron una duración máxima de ocho horas, y las pruebas de bombeo de 11 horas.

Para cada punto censado se tomaron coordenadas geográficas (UTM, WGS84), naturaleza del punto (noria, manantial, pozo entubado, etcétera), uso de la captación, profundidad al nivel estático y algunas observaciones adicionales.

# POZO	POZO	TIPO DE PRUEBA	DURACIÓN (min)	# POZO	POZO	TIPO DE PRUEBA	DURACIÓN
1	Texas	Recuperación	45	6	Villas de Atitalaquia	Recuperación	480
2	Cardonal/VIII .23507	Bombeo	520	7	Profundo Tlamaco	Bombeo	120
3	Santa María Nativitas Atengo	Bombeo	709	8	Zihuatanejo	Bombeo	560
4	La Ranfla	Bombeo	416	9	La Cantera	Bombeo	513
5	Teñhé	Bombeo	234				

Tabla 4.2 Pruebas de bombeo y recuperación

4.3.3 Geoquímica

Durante la campaña se midieron siete lecturas de datos geoquímicos; se utilizó un medidor multiparamétrico Hi 9828 (figura 4.1) de los pozos mostrados en la tabla 4.2. Los datos recopilados sirvieron para realizar mapas de STD.



Figura 4.1. Medidor multiparamétrico Hi 9828

La medición consistió en tomar una muestra de agua del pozo, se colocó en un recipiente previamente desinfectado, se introdujo el medidor hasta cubrir la parte ranurada del aparato y se tomó inmediatamente el dato del oxígeno disuelto (OD ppm), posteriormente se esperó unos minutos para medir los parámetros restantes los cuales consistieron en:

- Potencial hidrógeno (pH)
- Temperatura (°C)

- Presión atmosférica (mBar)
- Resistividad ($\Omega \cdot \text{cm}$)
- Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- Sólidos totales disueltos (tds ppm)
- Salinidad (sal)
- Potencial de óxido reducción (ORP)
- Oxígeno disuelto (OD ppm)

La figura 4.2 muestra en conjunto los puntos de verificación realizados en campo durante las dos semanas de trabajo.



Figura 4.2 Localización de los puntos de verificación realizados en campo

4.4. SECCIONES

4.4.1 Sección geológica

En la figura 5.17, capítulo 5, se muestra la sección geológica N-S del valle de Tula, que se utilizó como apoyo para la caracterización del acuífero en estudio. La traza de la sección se muestra en la figura 4.3.

Para la realización de la sección se utilizó el mapa geológico modificado de Vázquez-Palomera², los cortes litológicos proyectados a casi 1 km de la traza de la sección, sondeos eléctricos verticales, puntos de localización de manantiales termales y fríos, niveles estáticos de los pozos cercanos a la sección y caudales. Con esta información se generó la sección geológica, cuya parte norte fue inferida, y cuya información geológica se apoya en lo recopilado en el capítulo 3 apartado 3.1.2.

Con ayuda del software AutoCad 2011 se digitalizó la sección con escala vertical 1: 5000 y horizontal 1: 60000.

Debido a que los cortes litológicos no superan los 400 m, y los sondeos eléctricos verticales los 600 m se reconstruyó la parte inferior (*Formación El Doctor, Formación Mexcala y Conglomerado calcáreo*) de acuerdo a la literatura. La inclinación de las fallas mostradas es solamente una suposición, debido a que no existen datos estructurales.

² *Idem.*

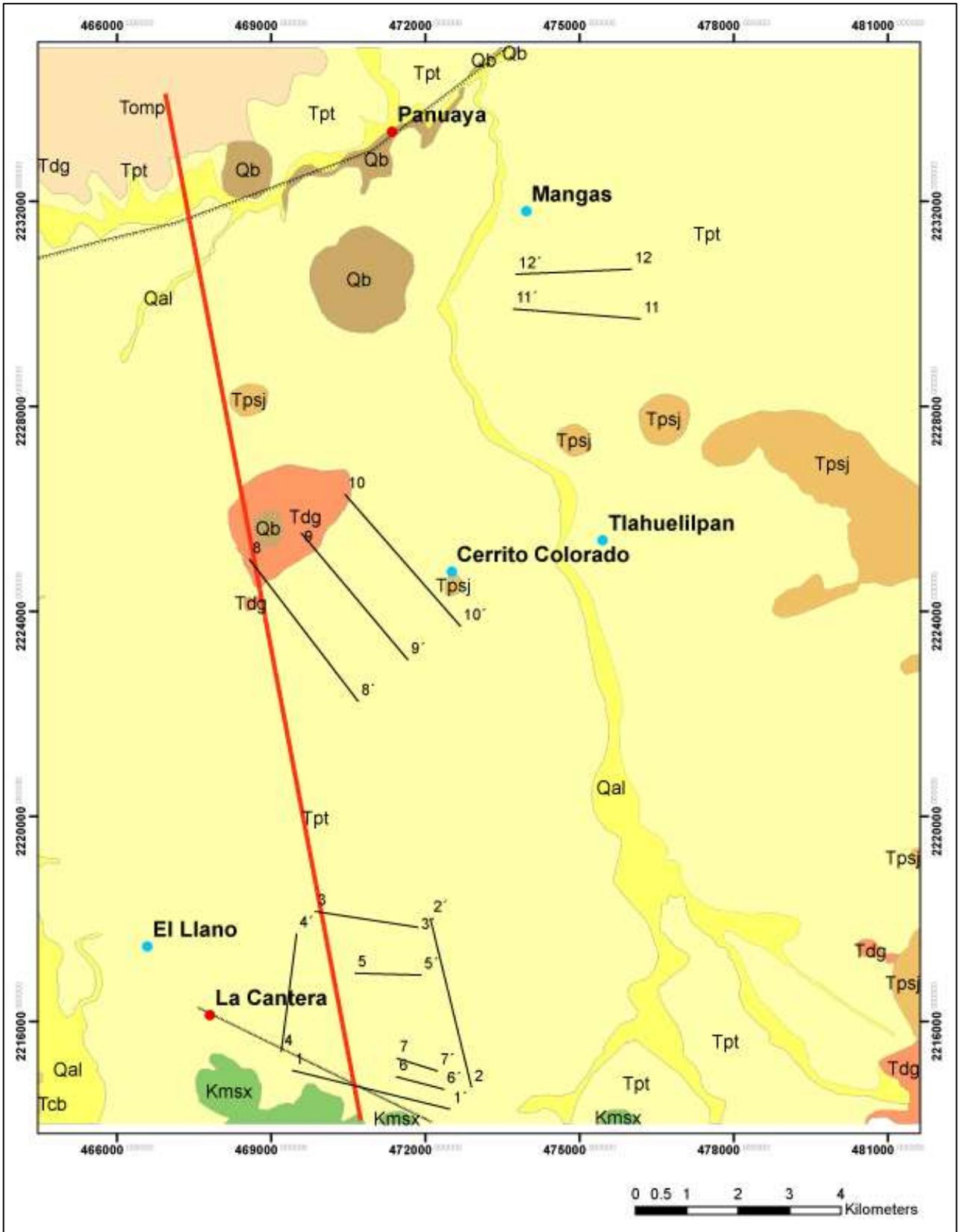


Figura 4.3. Traza de la sección geológica

4.4.2 Sección de flujo

Utilizando datos constructivos de pozos y la piezometría correspondiente al año 2012, se elaboró una sección de flujo (figura 5.18, capítulo 5) con la finalidad de determinar de manera esquemática los diferentes sistemas de flujo del agua subterránea. La sección es paralela al flujo dominante en el área de estudio (N-S), y fue dividida en dos segmentos. El primero comprende del sur hasta el pozo Teocalco 9, en dirección sur-norte. El segundo segmento va del pozo Teocalco 9 hasta la zona de Mangas, con rumbo N35°E. La ubicación de esta sección, así como de las secciones geofísicas referidas más adelante se muestran en la figura 4.4.

A partir del diseño constructivo de los pozos cercanos a la sección se tomó el punto medio de la tubería ranurada, debido a que se considera el punto de acumulación de la carga de posición y de la carga de presión, que en resumen definen a la carga hidráulica del pozo (puntos rojos con la clave del pozo). Dicho dato fue utilizado para realizar una interpolación que defina las líneas equipotenciales en sección. La profundidad y las cargas hidráulicas en las curvas equipotenciales están expresadas en metros.

Para esta sección se realizó la interpolación de las cargas hidráulicas con el software Surfer 9.0.

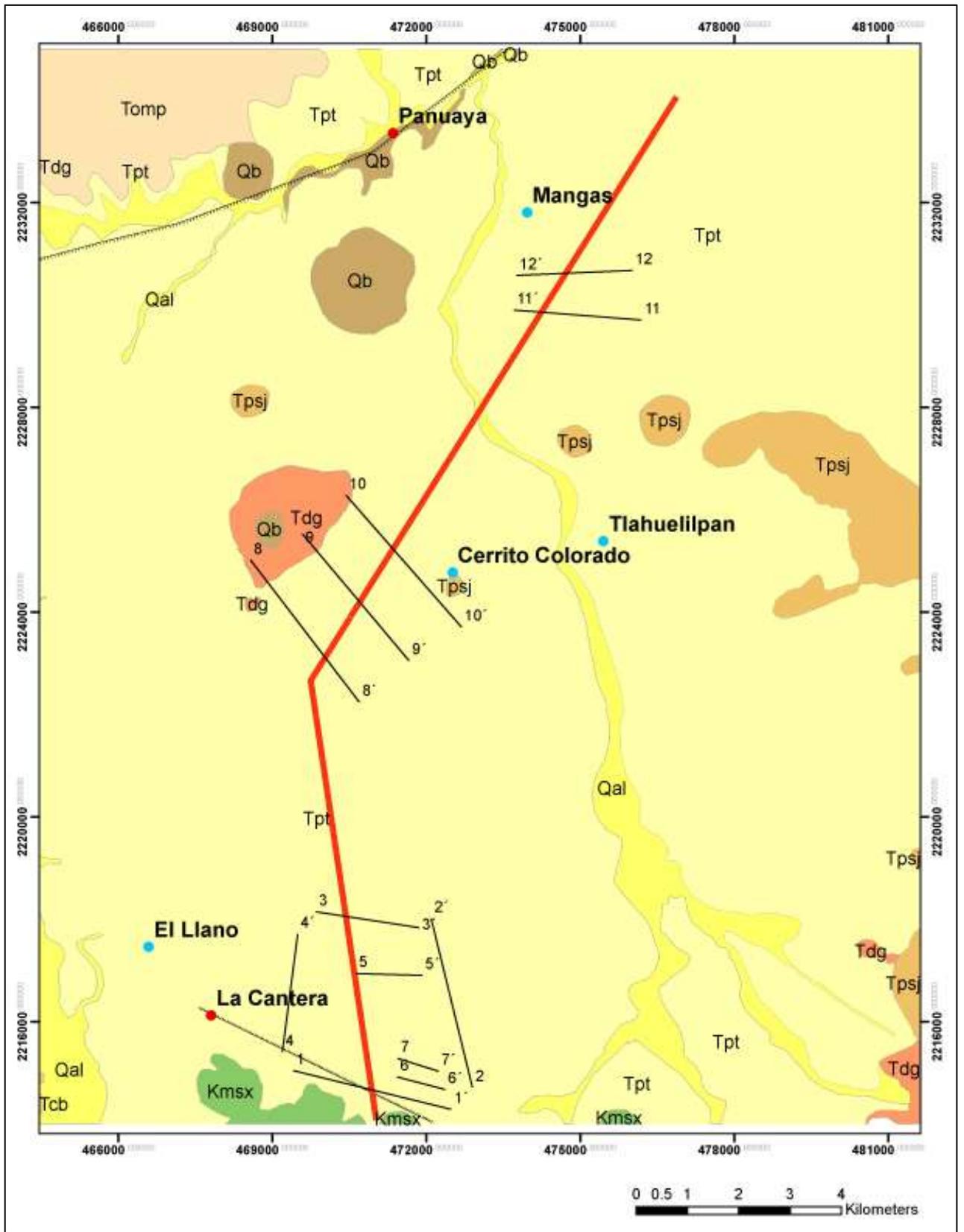


Figura 4.4 Traza de la sección de flujo y de los SEV

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

5.1.1. Artículos científicos, tesis y reportes técnicos

A continuación se realiza la síntesis del análisis de la información recopilada de artículos científicos, tesis y reportes técnicos.

La información reportada muestra que en general la toxicidad en las descargas de aguas residuales se presenta de moderada a alta. Solamente tres estaciones de monitoreo (19%) presentaron excelente calidad, con valores de DBO5 menores o iguales a 3 mg/l, lo cual se considera como agua no contaminada por materia orgánica biodegradable.¹

Las concentraciones de microorganismos en el agua infiltrada fueron en general muy bajas, pero la incidencia de coliformes fecales (presentes en 68% de las muestras) bacteriófagos somáticos (36%), giardia spp (14%) y los huevos de helmintos (8%) sugirieron un riesgo para la salud. Un tratamiento como nanofiltración sería necesario para que el agua infiltrada pudiera ser un suministro de agua potable seguro.²

Se encontró que los metales introducidos a través del riego tienden a acumularse en la capa arable de los suelos, mostrando después de 80 años concentraciones tres a seis veces mayores que en sitios con cultivo de temporal, aunque sin llegar aún a niveles críticos. La retención de metal por sustancias húmicas aumentó con el tiempo de riego. La profundidad también afectó a la asociación de metal con las sustancias húmicas.³

¹R., Montelongo-Casanova, A. J., Gordillo-Martínez, *et al.*, " Modelación de la calidad del agua del río Tula, Estado de Hidalgo, México", en *Dyna*, vol. 75, núm. 154, Universidad Nacional Autónoma de Colombia Medellín, Colombia, marzo 2008, pp. 5-18

² A., Chávez, C., Maya, C., *et al.*, "The removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico", en *Environmental Pollution*, vol. 159, 2011, pp. 1354-1362.

³ I. E., Reyes-Solís, C., Solís, *et al.*, " Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission", en *Microchemical Journal*, vol. 91, 2009, pp. 129-132.

Se apreció la persistencia y lixiviación de un grupo de fármacos ácidos, carbamazepina y tres perturbadores endócrinos en suelos del valle de Tula. La persistencia y movilidad de la carbamazepina sugirió un potencial para contaminar el agua subterránea.⁴

Fueron identificadas principalmente cuatro fuentes contaminantes: el suelo que contribuye a la composición elemental de los filtros con 26%, la refinería y la planta de energía con 20%, y dos emisiones industriales independientes suman 26%. Las últimas tres fuentes de contaminación indican que las actividades industriales llevadas a cabo en el corredor industrial tienen un impacto perjudicial en Tlaxcoapan, Hidalgo.⁵

Como resultado de que el uso del agua en la ciudad de México es aproximadamente de 86 m³/s, se producen y disponen 60 m³/s de aguas residuales al valle de Tula. En este valle el agua residual no tratada es usada para el riego agrícola de 95,000 hectáreas. Sin embargo, las enfermedades estomacales en este sitio han aumentado 16 veces en niños menores de 15 años. En conjunto con el uso agrícola de las aguas residuales, la recarga no intencional del acuífero de Tula ocurre y cambia por completo el ambiente en el valle. El acuífero se considera como una nueva fuente de agua para la ciudad de México.⁶

5.1.2. Mapas de la región

Las observaciones derivadas del procesamiento de la información geológica e hidrogeológica son las siguientes:

⁴ R., Gibson, J. C., Durán-Álvarez, *et al.*, "Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico", en *Chemosphere*, vol. 81, 2010, pp. 1437-1445.

⁵ M. A., Martínez-Carrillo, C., Solís, *et al.*, "Atmospheric elemental concentration determined by particle-induced X-ray emission at Tlaxcoapan in central Mexico, and its relation to Tula industrial-corridor emissions", en *Microchemical Journal*, vol. 94, 2010, pp. 48-52.

⁶ B., Jiménez, "The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys", en *The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, pp. 24.

Se propone un área de estudio acotada por las coordenadas:

14 Q	
$X_1 = 464,000$	$X_2 = 482,000$
$Y_1 = 2,235,000$	$Y_2 = 2,235,000$
$X_3 = 482,000$	$X_4 = 464,000$
$Y_3 = 2,214,000$	$Y_4 = 2,214,000$

El mapa geológico que se tomó como base para esta tesis fue el realizado por Vázquez-Palomera⁷. A partir de éste, se digitalizó la información en el software ArcGis 9.3 (figura 5).

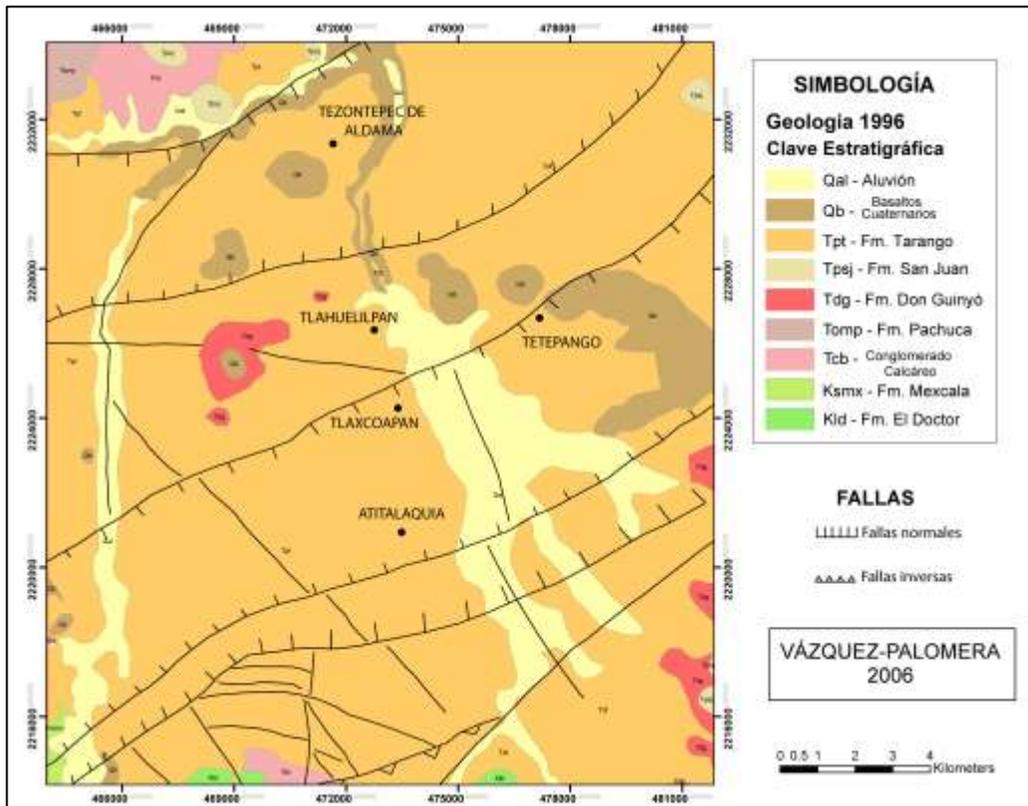


Figura 5. Mapa geológico de la región

⁷ Vázquez, Palomera, "Mapa geológico de la región", Comisión Federal de Electricidad, Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Estudios Geológicos, Departamento de Geohidrología, 1996.

5.1.3 Cortes litológicos

Para determinar la litología del medio acuífero se utilizaron cortes litológicos proporcionados por la CFE y la CONAGUA, éstos son los únicos disponibles en el área de estudio.

Se realizaron modificaciones con la finalidad de unificar la geología y formar paquetes o unidades significativas para el área estudiada. Se revisaron 35 cortes litológicos proporcionados por la CFE y 10 por la CONAGUA (anexo 2), de los cuales se obtuvieron 12 variaciones litológicas que se indican en la figura 5a.

SIMBOLOGÍA

S	Suelo
Ta	Toba arenosa
TaA	Toba areno arcillosa
TAa	Toba arcillo arenosa
TA	Toba arcillosa
TaBf	Toba arenosa con basalto fracturado
TABf	Toba arcillosa con basalto fracturado
Tp	Tepetate
Bf	Basalto fracturado
B	Basalto
D	Dolomía
Cz	Caliza

Figura 5a. Litologías encontradas en los pozos de la zona de estudio

5.1.4 Sondeos eléctricos verticales

Las unidades hidrogeológicas se determinaron con ayuda de los estudios geofísicos que se recopilaron. A partir de ellos se dividió el subsuelo del área de estudio en:

Unidad	Litología	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Profundidad (m)	Características Hidrogeológicas
1	Arcillas, arenas, tezontle	Variable 11-291	1-10	Semipermeable
2	Tobas areno-arcillosas con intercalaciones de basalto	27-98	10-80	Semipermeable
3	Tobas de arena, gravas, limos y arcillas con horizontes delgados de caliche	5-20	Hasta 140	Semipermeable
4	Tobas arenosas con intercalaciones gruesas de basalto	220-943	56-270	Permeable
5	Tobas arcillosas	2-5	65-410	Impermeable
6	Conglomerado calcáreo/calizas	227-1165	A partir de los 400	Permeable

Tabla 5. Unidades geoelectricas con resistividades, espesores y profundidades

5.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS GEOLÓGICOS

5.2.1. Verificación geológica

Topografía

Se realizó un mosaico de las cartas topográficas (1: 50,000 INEGI; 1 x 1 grado ASTER), de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) INEGI y ASTER. Posteriormente, se re proyectaron a un sistema PCS (Projected Coordinate Systems) con una resolución de 28.5, utilizando la herramienta “Project Raster / Data Management” con el método bilineal de remuestreo. Estos modelos representan en un arreglo reticular el valor aproximado de la elevación del terreno, por lo tanto la resolución espacial del MDE es de suma importancia de acuerdo a los fines para los que se pretenda utilizar la información.

Para los fines de esta tesis se utilizó el MDE ASTER (figura 5.1), debido a que el adquirido en el INEGI no representaba de manera continua las pendientes, y mostraba escalonamientos entre cada curva de nivel. Por el contrario, el modelo ASTER, a pesar de tener una equidistancia entre cada curva de nivel de 1 metro como el modelo de INEGI, tiene la virtud de mostrar una pendiente continua entre cada elevación.

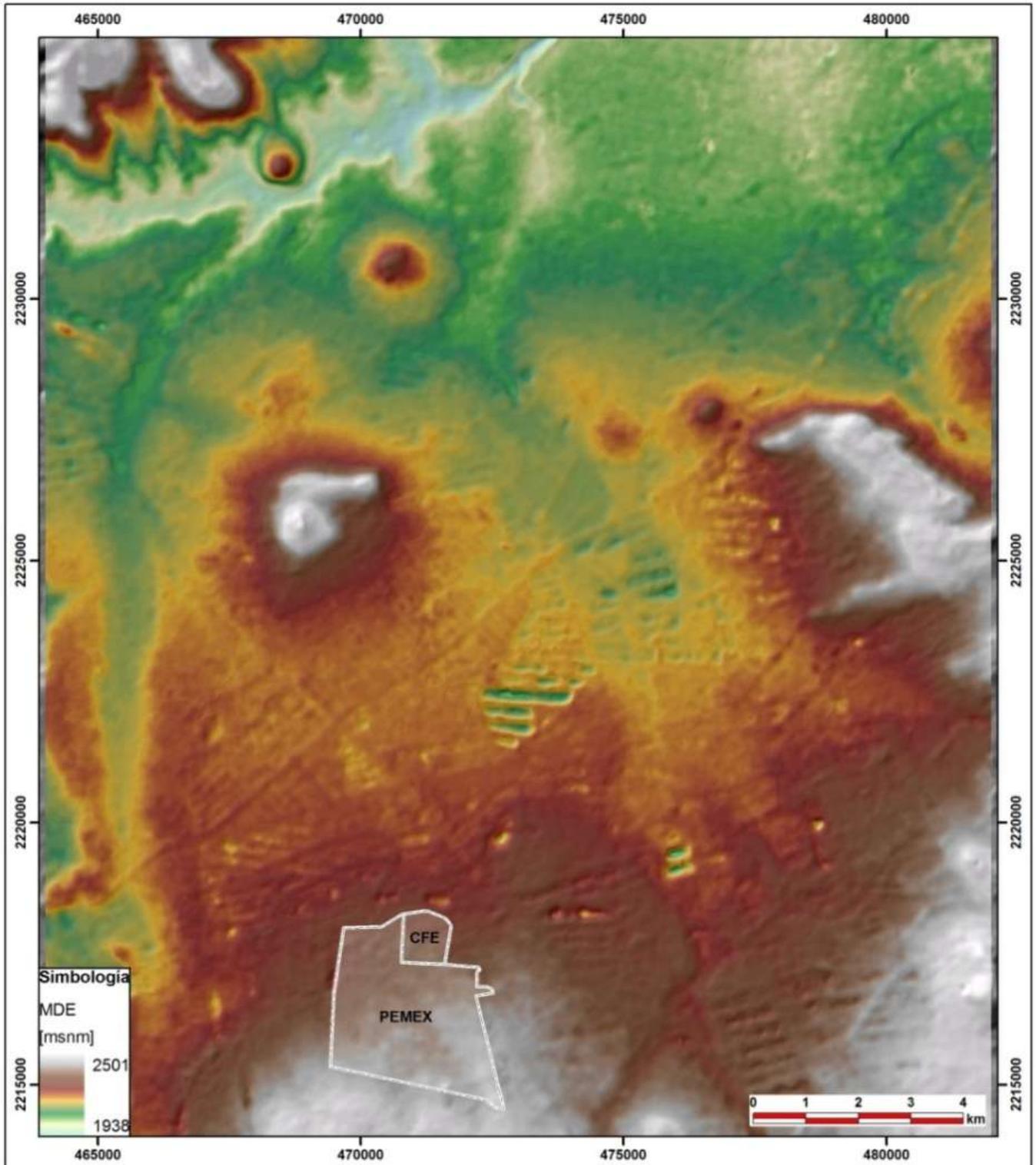


Figura 5.1 Modelo digital de elevación

Se eligió el tamaño de cada celda del modelo ASTER de 30 x 30 metros. Esta decisión se tomó en función de la extensión del área de estudio, con el fin de que la información representada en el mapa mostrara una precisión considerable que permitiera apreciar cambios por mínimos que éstos sean. De esta manera, la interpretación de los mapas será más certera y apegada a la realidad del área de estudio.

A partir de los modelos reproyectados se determinó la pendiente topográfica (figura 5.2) mediante la herramienta *Slope / SpatialAnalyst* en términos de porcentaje utilizando los rangos establecidos en la tabla 5.1.

Topografía (pendiente %)	
Intervalo	Color
0-2	Rojo
2-6	Naranja
6-12	Amarillo
12-18	Verde claro
>18	Verde fuerte

Tabla 5.1 Valores para el factor de topografía

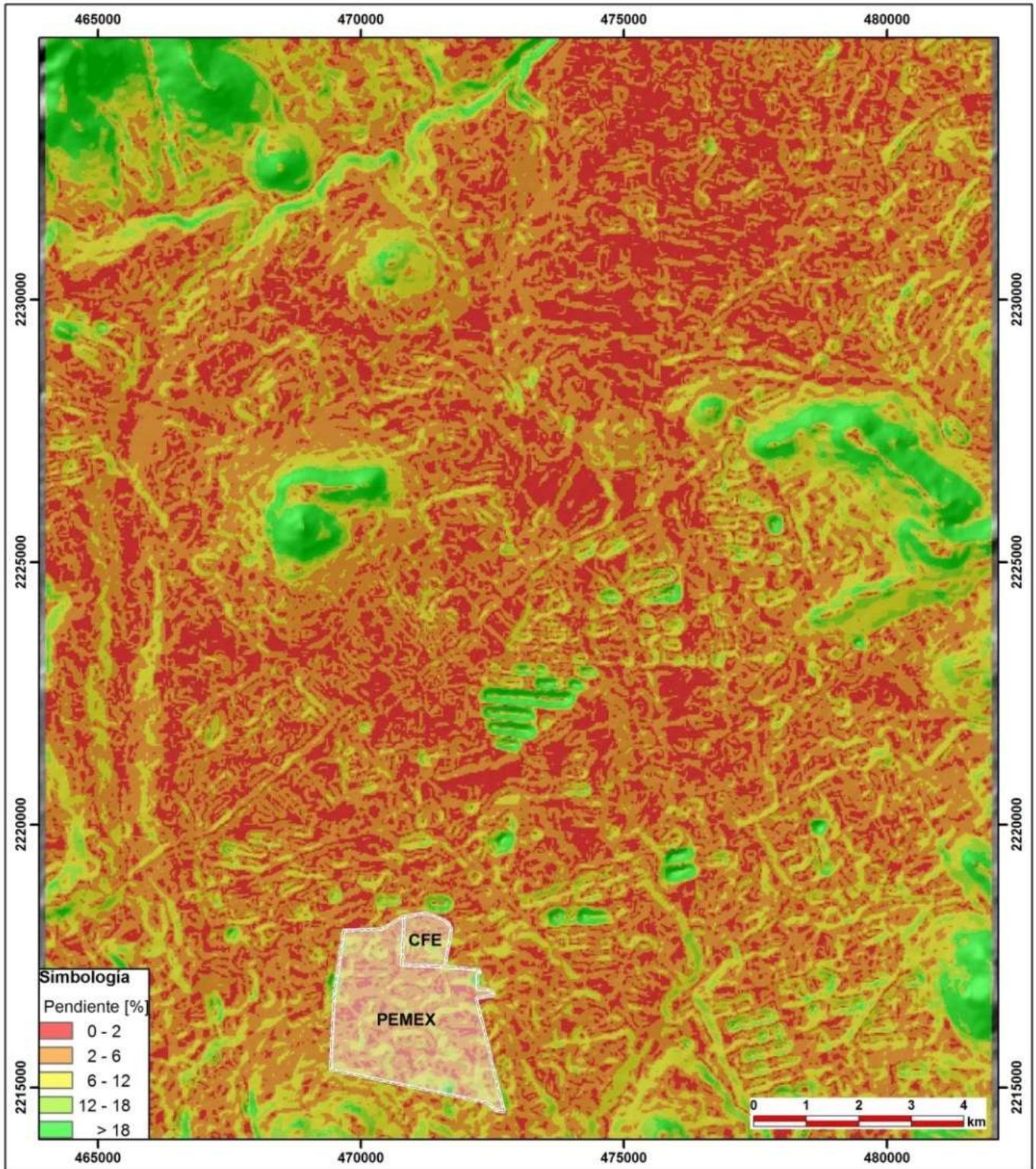


Figura 5.2 Mapa de pendientes topográficas

Geología y estratigrafía local

De acuerdo a la figura 5, se presentan los resultados de la geología verificada en campo. Se modificaron algunos aspectos geológicos; dando como resultado el mapa final (figura 5.3).

En el área de estudio las rocas más antiguas que afloran corresponden a las Formaciones *El Doctor*, *Cuautla* y *Mexcala*. Éstas se encuentran en la parte sur del área de estudio, entre las poblaciones de Zacamulpa, Atotonilco, Ocampo y Vindho. Sobre estas rocas descansan conglomerados del *Grupo El Morro* del Eoceno-Oligoceno, compuestos por fragmentos de calizas, que afloran en una pequeña extensión al suroeste del área del lado izquierdo del río Tula (X=464200, Y=2214660).

Sobreyaciendo a estas rocas se encuentra la Formación Pachuca, que aflora al noroeste del área de estudio (X=466300, Y=2234000).

La Formación Don Guinyó cubre parte del cerro Xicuco en la porción central oeste (X= 469359, Y=2225997), además aflora al sureste en las faldas del cerro Los Pechitos, cerca de la margen del Río Salado (X=481643, Y=2214787).

Siguiendo la secuencia estratigráfica se encuentran afloramientos de rocas basálticas pertenecientes a la Formación San Juan, al noroeste en la parte superior del cerro El Sombrerete, al oriente de Tlahuelilpan en un alto topográfico alargado de 7 km de longitud, al sureste en el cerro Los Pechitos y finalmente hacia la parte central norte en forma de montículos.

La planicie del valle está compuesta por la Formación Tarango; la cual comprende depósitos clásticos compuestos de gravas, arenas, limos y arcillas, así como ceniza volcánica acumulada en forma de rellenos y piroclásticos intercalados e interdigitados de manera caótica, errática y discontinua.

Por último, encontramos rocas basálticas presentes en la porción noroccidental del área, a lo largo de una falla con orientación NE-SW que coincide con el río Tula.

Estos derrames afloran como dos estructuras cónicas separadas por dicho río, con una alineación entre ellos de NW-SE.

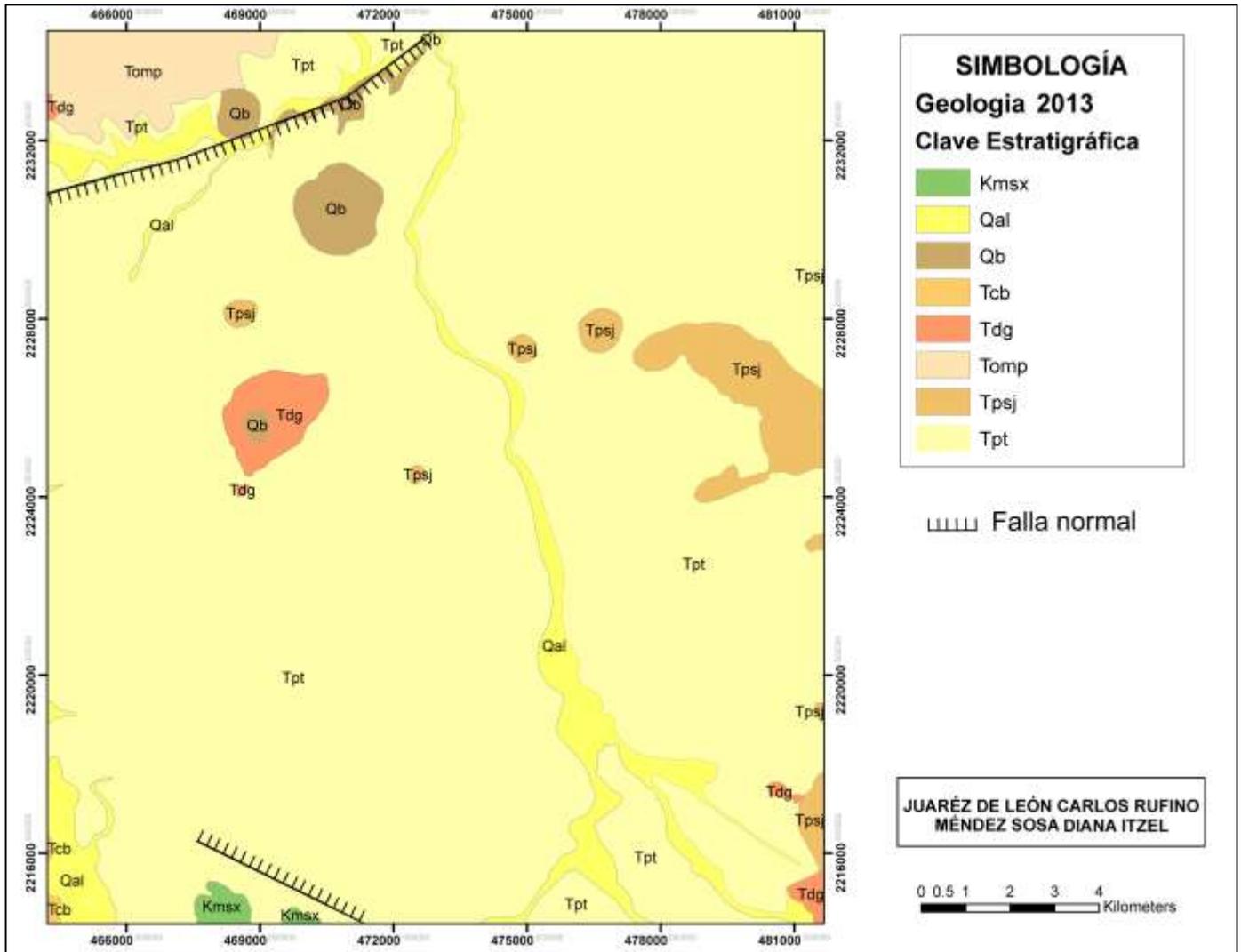


Figura 5.3 Mapa geológico del área de estudio

5.2.2. Puntos de verificación de suelo

Tipo de suelo

Con los datos de tipo de suelo recopilados en la campaña de campo se corroboró, sobre todo, el suelo tipo Rendzina (caliche). Éste es un suelo de tipo calcáreo, proveniente de la meteorización de rocas carbonatadas, generalmente delgado, y es común encontrar sembradíos en las áreas marcadas como Rendzina en la

carta de suelos del INEGI. Los puntos de verificación realizados en el trabajo de campo de septiembre y octubre de 2012 se muestran en la figura 5.4, sobrepuestos en la carta edafológica del INEGI, digitalizada en ArcGis. Lo anterior con la finalidad de actualizar dicha carta.

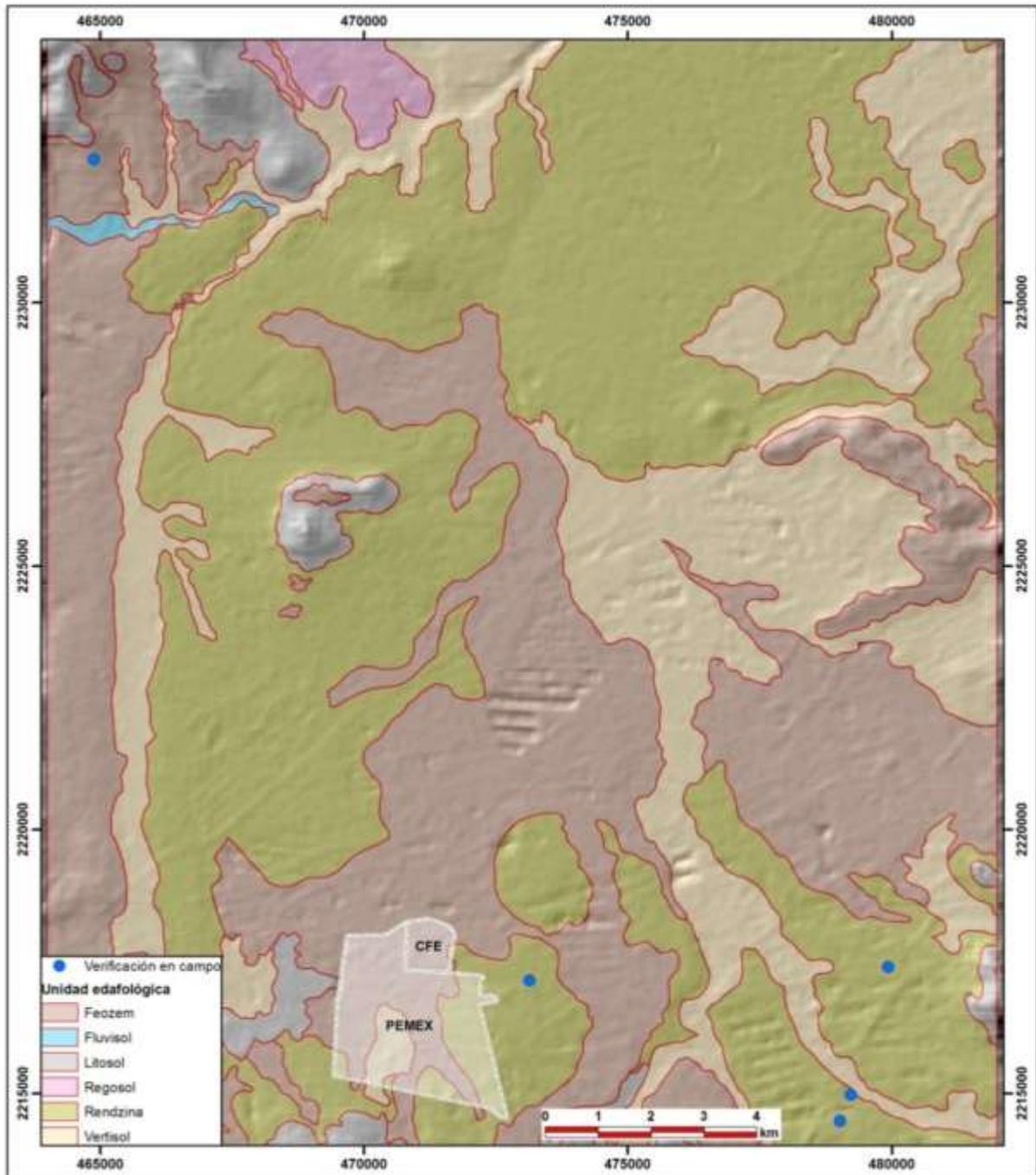


Figura 5.4. Carta de suelos del INEGI con puntos de verificación

En la tabla 5.2 se muestran los diferentes tipos de suelo que se encuentran en el área de estudio, así como una breve descripción de cada uno de ellos.

Tipo de suelos	Clasificación
Luvisol (L)	Arcillas no agregadas
Vertisol (V)	Agregado arcilloso o comprimido
Feozem (H/HS)	Arenas
Fluvisol (J)	Arenas
Litosol (I)	Fino o ausente
Regosol (R)	Fino o ausente
Rendzina	Fino calcáreo

Tabla 5.2 Tipos de suelo en el área de estudio

5.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO DE LOS ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

5.3.1 Verificación hidrogeológica

La información piezométrica recopilada, junto con la información obtenida en campo, se utilizó para la configuración de la profundidad del nivel estático, y para complementar bases de datos de caudales y niveles dinámicos.

Se estudiaron los diferentes sistemas de pozos que se encontraron en la zona de estudio. Por parte de PEMEX se localizaron los sistemas: Tezontepec, Teocalco y Mangas, y por parte de CFE: Sistema 1 y Sistema 2. Existe también una batería de pozos dentro de la refinería “Miguel Hidalgo” cuya información hidrogeológica se desconoce totalmente. Por último, se tienen los pozos pertenecientes a las comunidades y que sirven como fuente de suministro para consumo doméstico (figura 5.5). En total, el censo cuenta con 155 pozos (anexo 1).

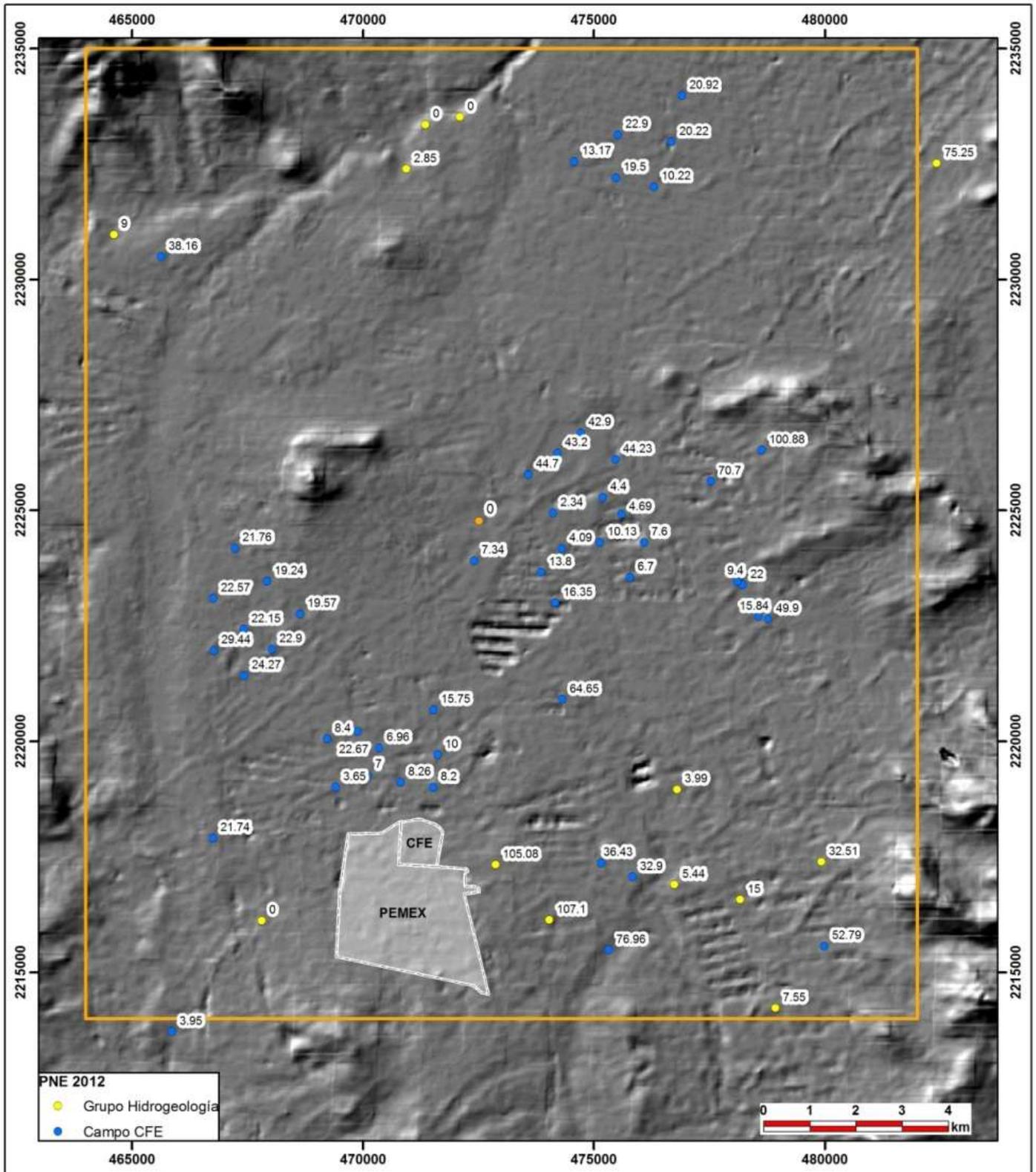
Se ubicaron los pozos con las coordenadas incluidas en un formato de salida del software Google Earth (KMZ). Se corroboraron las coordenadas mediante Google Earth, Google Street y las visitas a campo realizadas. Se observaron, en su minoría, pozos con un margen de error de ± 30 metros.

Las profundidades al nivel estático para el periodo de 2000 a 2010, y las específicas del mes de junio de 2012, fueron complementadas con las obtenidas en campo. Con esta información se generó una base de datos, que incluye la clave del pozo y las coordenadas obtenidas en campo mediante el uso de GPS e imágenes satelitales.

Después de analizar los valores de profundidad e hidrógrafos, se acordó utilizar los valores del año 2012 (figura 5.6), por ser el año más completo con respecto a la información requerida y estudiada. Se generó una base de datos con un total de 79 niveles; éstos han sido interpolados dentro del área de estudio para obtener los niveles correspondientes a algunos pozos provenientes de la CONAGUA.

Antes de realizar la configuración final, se analizaron los datos someros y profundos por separado, así como los valores ubicados fuera del área de estudio para determinar cuál era el comportamiento del acuífero, y así lograr un mejor resultado.

En la figura 5.7 se observa la configuración para profundidades menores a 40 m, mientras que en la figura 5.8 la configuración para valores mayores a 40 m. Esta división de niveles se hizo con base en dos tendencias zonales observadas; una donde los niveles estáticos fluctúan entre 0 y 30 m y otra donde van de 40 m en adelante. La decisión se justificó a partir del análisis geológico de la sección esquemática (figura 5.17).



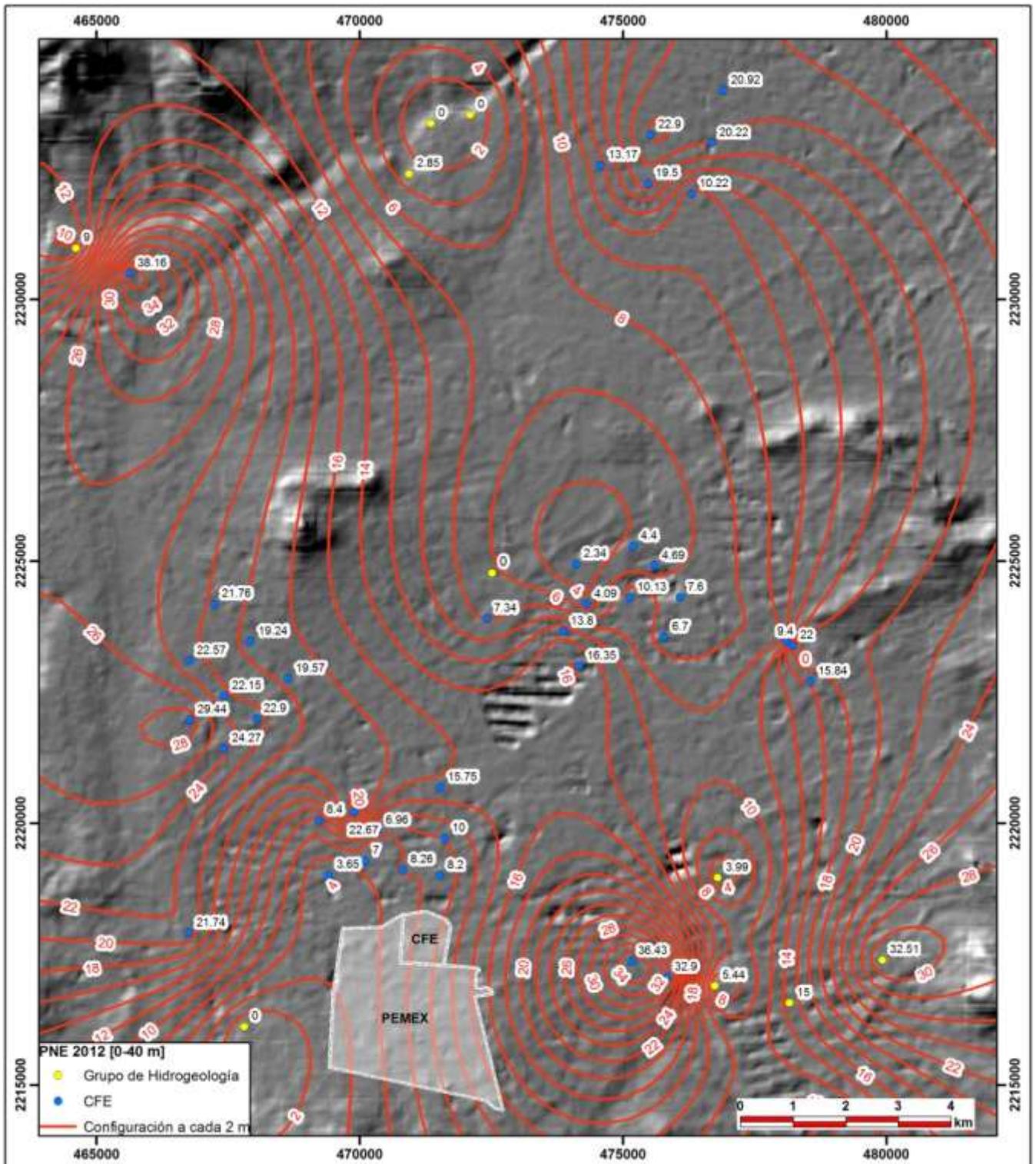


Figura 5.7 Configuración de PNE para valores menores a 40 m

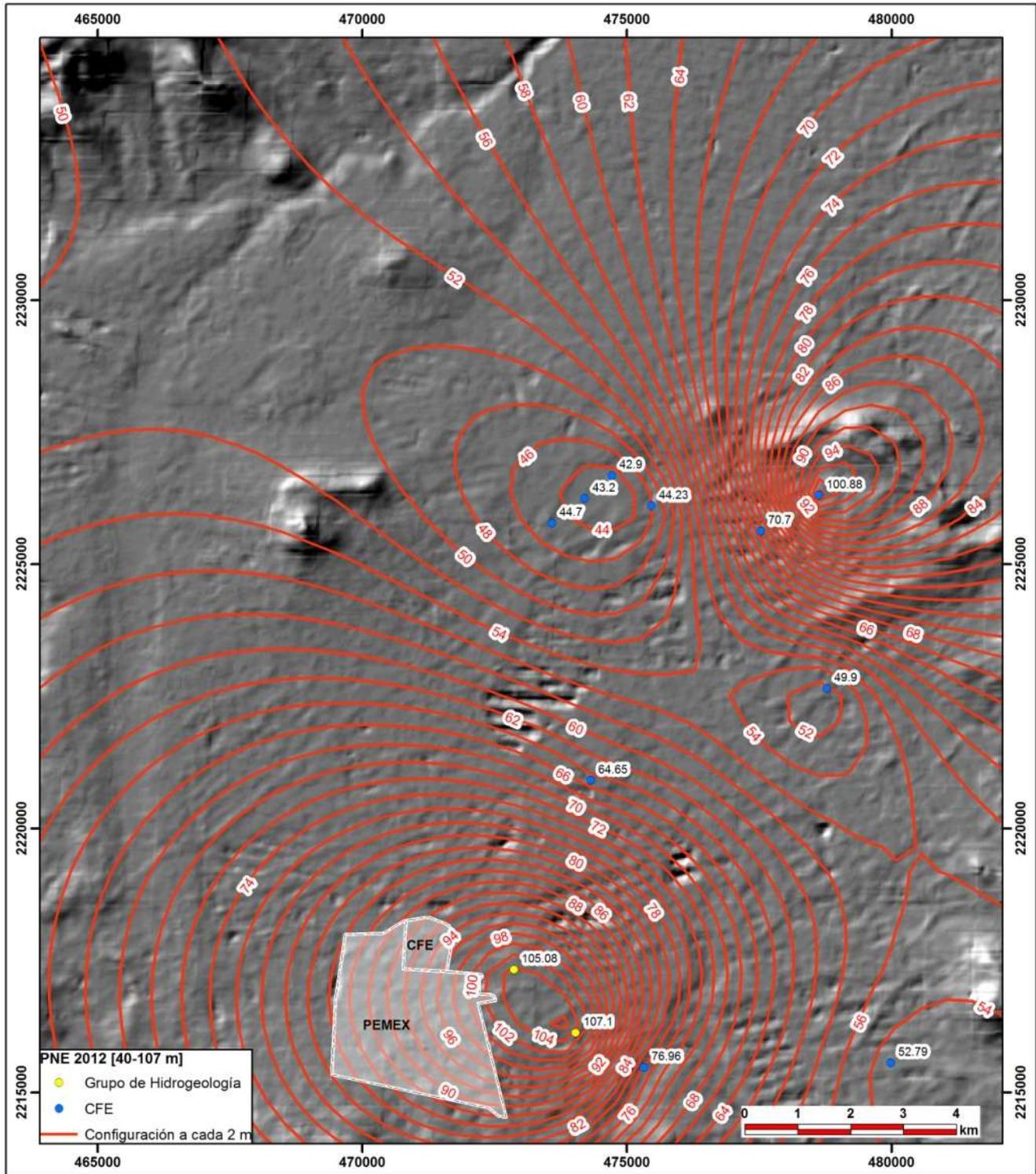


Figura 5.8 Configuración de PNE para valores mayores a 40 m

Las zonas con niveles mayores a 80 m corresponden a la zona industrial al oriente de la central termoeléctrica y a las inmediaciones del poblado de Muntepec de Madero.

Utilizando los datos finales se generó una primera configuración con ayuda del software *Surfer*, y con base a ésta se realizó una segunda configuración (a mano) con mayor sensibilidad, logrando un mejor ajuste de las curvas.

Una vez realizada dicha configuración se escaneó el mapa con las curvas trazadas, se exportó en *ArcGis* como imagen y se digitalizó. Estas curvas representan un *shape* de líneas, y cada línea representa un valor de profundidad. La configuración de los valores finales se observa en la figura 5.9.

Posteriormente, con el software *ArcGis* y la herramienta *Topo to Raster* se transformó el *shape* de líneas a raster. En la figura 5.10 se observa la configuración final de la profundidad al nivel estático, así como el *raster* generado a partir de la figura 5.9.

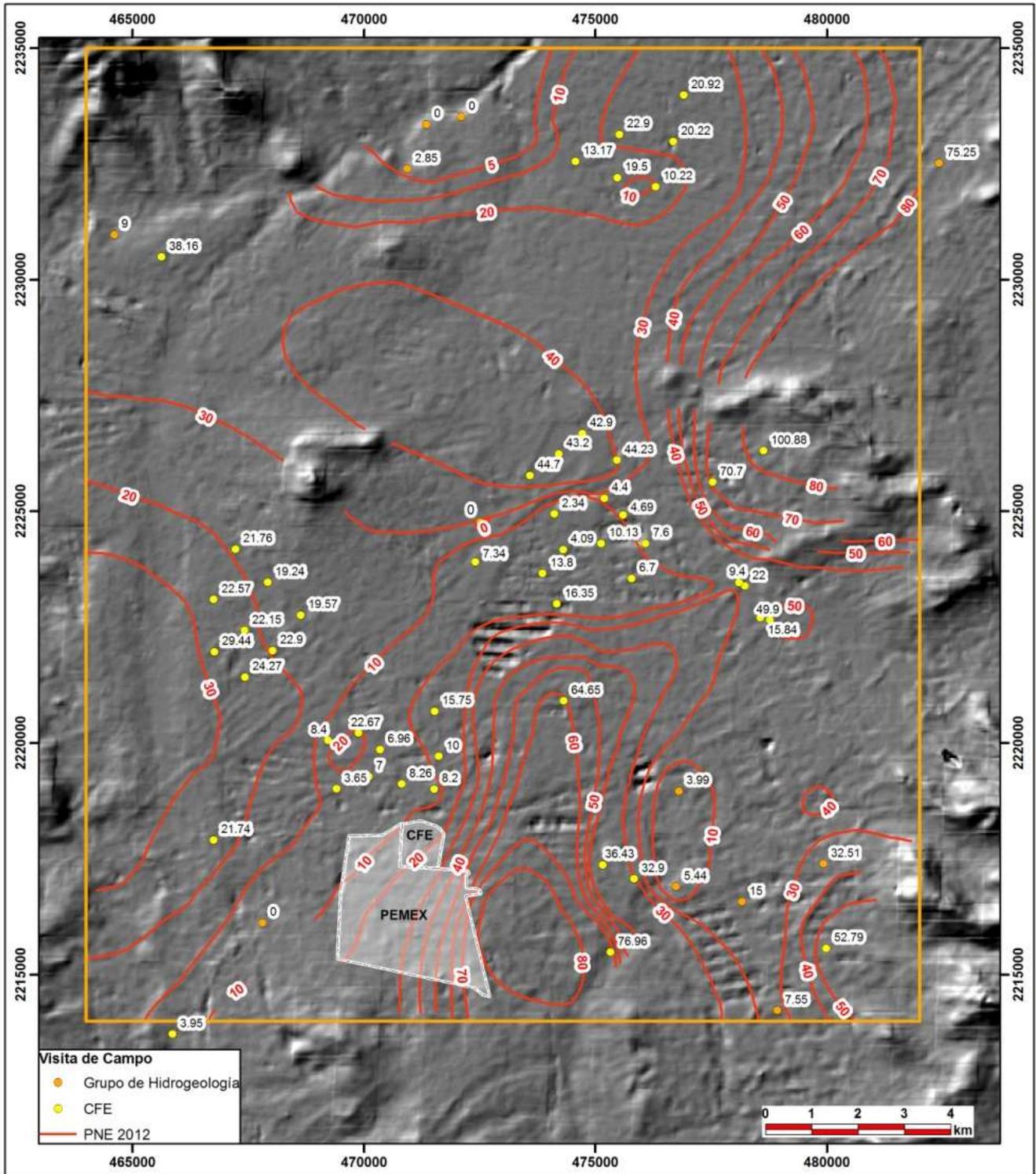


Figura 5.9 Configuración de la profundidad al nivel estático

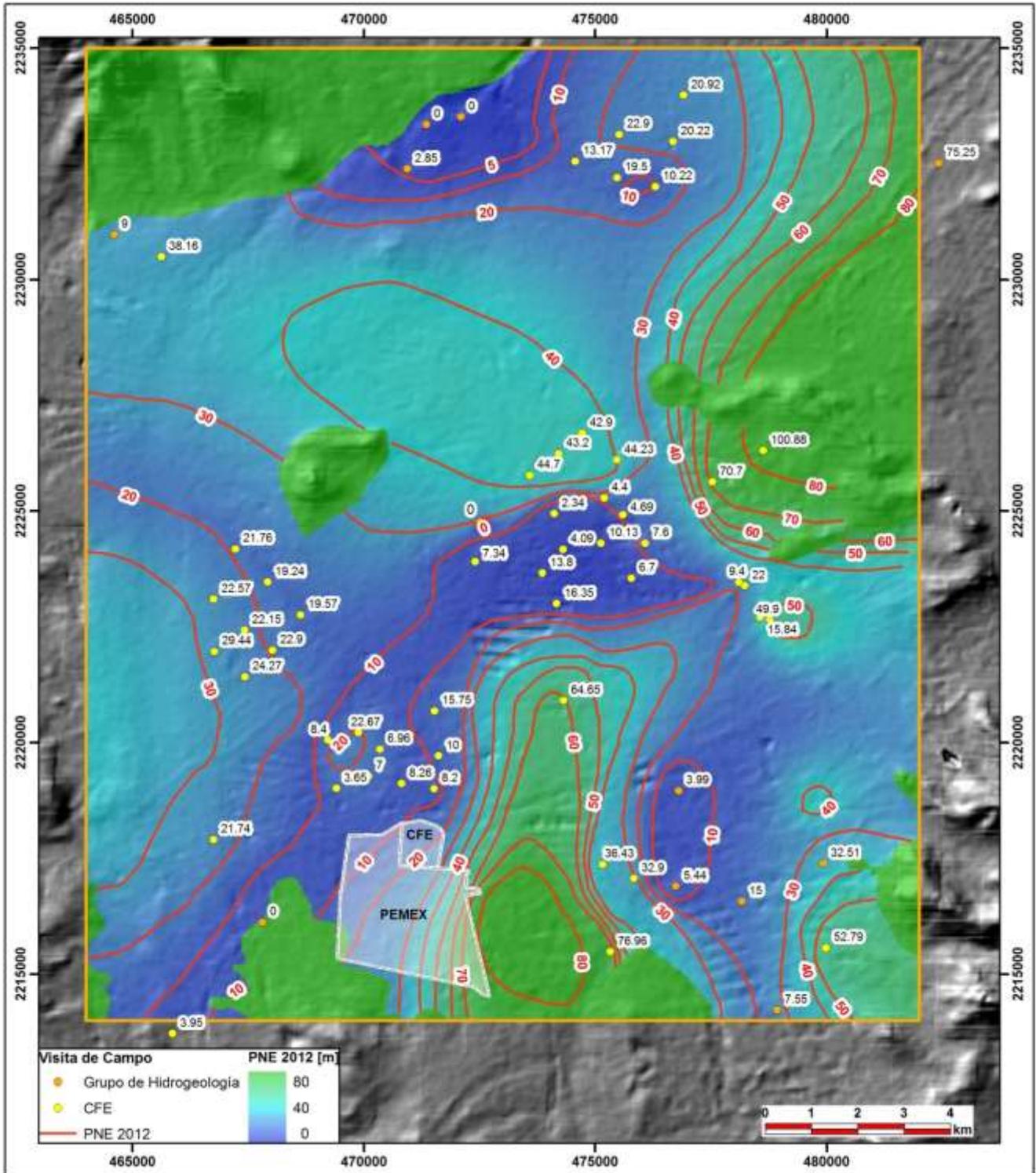


Figura 5.10 Raster y configuración final de la profundidad al nivel estático

5.3.2. Pruebas de bombeo y recuperación

La información recopilada se utilizó para calcular los parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica.

De las 25 pruebas de bombeo que se recopilaron, se reinterpretaban 21 mediante los métodos analíticos de Theis, Cooper-Jacob, Hantush, Neuman y Tartakovsky-Neuman, lo anterior para tener el criterio de poder elegir la mejor solución para cada prueba.

Estas pruebas se analizaron con el software de *AQTESOLV* y *Visual Two-zone Model* para contar con mejores interpretaciones. Solamente 18 de ellas se reinterpretaban mediante el método numérico de Rushton-Redshaw y Rathod-Rushton, debido a la escasa información de cortes litológicos y secciones geofísicas. Asimismo, en la campaña de campo se colectaron siete pruebas de bombeo y dos de recuperación, de las cuales se reinterpretaban seis de bombeo y una recuperación, también por los métodos analíticos citados anteriormente. Se omitió la prueba de bombeo realizada en el pozo Zihuatanejo y la prueba de recuperación en el pozo Villas de Atitalaquia, debido a la poca confiabilidad de los datos. Las interpretaciones de estas pruebas de bombeo se muestran en el anexo 2.

En el caso de los métodos analíticos, se valoró cuál era la interpretación adecuada para cada prueba de bombeo, pues en la mayoría de los casos no estaba definido el comportamiento de la curva, correspondiente a un acuífero libre o semiconfinado.

El criterio para descartar la interpretación mediante el método de Hantush de los métodos de Neuman o Tartakovsky-Neuman fue el tiempo de estabilidad de la curva y el valor arrojado por el caudal específico (T de Galofré) previamente determinado. Para los casos donde la curva no alcanzó a estabilizarse se utilizaron las soluciones de Cooper-Jacob y Theis eligiendo la curva que mejor se ajustó a los datos tiempo-abatimiento y que sustentó un valor de transmisividad

del mismo orden que el caudal específico. Para la interpretación de la prueba de recuperación se utilizó el método de Cooper-Jacob, adaptando la curva de tiempo-abatimiento a la curva tiempo-abatimiento residual.

Las gráficas de estas interpretaciones se muestran en el anexo 2, así como las gráficas de abatimiento-tiempo en *log-lin* de cada prueba de bombeo.

Por otro lado, para la determinación del valor de la conductividad hidráulica, a partir de los valores calculados de transmisividad mediante los métodos analíticos, se estimó el espesor saturado del acuífero a partir de la información del espesor ranurado total y la litología que éste comprende; de manera que el espesor saturado, en la mayoría de los casos, es menor que el espesor ranurado. Sin embargo, este análisis se encuentra limitado, ya que solamente se realizó para las 18 pruebas de bombeo que cuentan con información litológica y construcción de los pozos. Para las 10 pruebas restantes, el espesor saturado es un estimado que comprende de la profundidad al nivel estático hasta la profundidad total estimada del pozo, la cual se asignó de acuerdo a la profundidad alcanzada por el nivel dinámico, y cuyo resultado de transmisividad se justifica principalmente por el valor obtenido mediante el caudal específico.

Para la determinación de la conductividad hidráulica mediante el método numérico de Rushton-Redshaw y Rathod-Rushton, se construyó un modelo conceptual a partir de la información de los cortes litológicos y de la construcción del pozo. Este modelo conceptual fue semiconfinado para 18 pruebas de bombeo, y libre para las 10 restantes que no cuentan con corte litológico, de manera que el espesor del acuífero corresponde al espesor saturado estimado.

Una vez que se obtuvieron los valores de conductividad hidráulica (figura 5.11), derivados de las interpretaciones de las pruebas de bombeo, se eligieron los resultados de los métodos analíticos para la configuración de la misma. Lo anterior, debido a que el método numérico requiere mayor información litológica y geofísica del pozo para una interpretación confiable, y ésta no está disponible para 10 de los pozos.

Finalmente, se acordó asignarle un valor de conductividad hidráulica baja a las fronteras consideradas como impermeables, de manera que al cerro Xicuco se le asignó un valor de 1.0 a 0.4 [m/d], a las andesitas (Paleógeno-Neógeno) de la zona NW 0.1 [m/d], a las calizas cretácicas de la zona sur 0.1 [m/d]. Estos valores corresponden a una conductividad hidráulica menor a la obtenida en los pozos más cercanos a ellas. A los basaltos (Cuaternario) de la zona Este se les asignó una conductividad hidráulica de 1.9 [m/d], por ser el valor calculado para el pozo Tlahuelilpan, cuya extracción se lleva a cabo principalmente en éstos. Con los valores de conductividad hidráulica asignados a las fronteras y los obtenidos de las pruebas de bombeo se realizó la configuración final (figura 5.12).

A continuación se presenta la tabla de valores que fueron empleadas para definir la transmisividad para la configuración de la conductividad hidráulica:

Nombre del pozo	Profundidad total [m]	Tubería lisa [m]	Tubería ranurada [m]	Espesor saturado [m]	Fecha de la prueba	Duración [h]	PNE [m]	Q [l/s]	s max [m]	Solución	T Gal [m ² /d]	T [m ² /d]	K [m/d]
Bojay	180	-	-	126.73	29/03/1996	12	53.27	20	9.27	Cooper-Jacob	215.75	216.86	1.71
Tlahuelilpan	250	100	150	115	01/11/1996	24	59.73	30	8.47	Hantush	354.19	215	187
Teocalco 1	139	27	112	55.51	08/04/1999	12	25.49	40.15	50.96	Hantush	78.79	86.9	157
Mangas 5	174	96	78	30	25/10/1995	24	14.19	60	8.88	Hantush	675.68	655	21.83
Teocalco 5	87	70	17	17	12/06/1996	11	18.01	90	4.38	Tartakovsky-Neuman	2054.79	2534.5	149.09
5 - Sistema 1	90	10	80	68	16/05/1996	56	8.93	63.3	8.09	Hantush	782.45	475.2	6.98
6 - Sistema 1	90	10	80	71.82	18/05/1996	24	6.19	80	5.96	Hantush	1343.41	815.5	11.36
Mangas 7	161	97	64	64	21/04/1996	12	16.94	65	14.65	Neuman	443.69	344	5.38
Teocalco 7	218	93	125	97.72	18/12/1995	15	15.28	100	2.33	Hantush	4291.85	2302.1	23.56
Mangas 9	176	94	82	50	17/11/1995	13	22.75	60	8.39	Hantush	715.14	760	15.2
9 - Sistema 2	140	70	70	70	05/02/1982	17	19.6	87.9	10.04	Hantush	875.5	526.5	7.52
Mangas 11	182	79	103	63	21/12/1998	16.5	23.42	60	11.57	Cooper-Jacob	518.58	831.58	13.2
Teocalco 11	188	114	74	70	18/05/1996	12	6.88	90	34	Hantush	264.71	374	5.34
Mangas 12	170	-	-	148.21	13/11/1997	3	21.79	60	22.1	Hantush	271.49	178.7	1.21
14 - Sistema 2	160	88	78	67	01/06/1982	4	4.5	103.79	15.01	Hantush	691.47	702	10.48
Teocalco 15	110	40	70	34	04/07/1996	12	20.93	60	34.41	Tartakovsky-Neuman	174.37	215.5	6.43
Teocalco 17	216	72	144	61.5	09/11/1995	5	19.14	128	2.71	Hantush	4723.25	7130	115.93
Teocalco 19	116	54	62	56	26/07/1996	12	18.85	80	18.33	Tartakovsky-Neuman	436.44	410	7.32
Teocalco 21	120	50	70	70	22-dic	12	20.84	70	15.36	Tartakovsky-Neuman	455.73	349	4.99
Carbón Activado CFE	150	-	-	89.05	04/04/1900	1.95	55.95	5	10.58	Cooper-Jacob	47.26	20.6	0.23
Los Cuates Bomintza	200	-	-	41.47	07/05/1996	19	28.53	9.5	14.86	Theis	63.93	54.37	1.31
Texas	120	-	-	66.58	30/04/1996	3.2	53.42	8	8.22	Cooper-Jacob	97.32	44.62	0.67
Tlamanca	140	-	-	55.14	-	2	84.86	20	19.92	Cooper-Jacob	100.4	50.09	0.91
Cardonal	100	-	-	67.3	-	8.67	32.71	18	20.31	Cooper-Jacob	88.63	53.75	0.8
Atengo	100	-	-	63.51	-	11.81	36.49	25	3.63	Cooper-Jacob	688.71	865.36	13.63
La Camtera	100	-	-	70.9	18/10/2012	8.55	29.1	12	23.4	Cooper-Jacob	51.28	15.27	0.22
La Ranfla	80	-	-	76.01	18/10/2012	6.93	3.99	25.67	6.8	Cooper-Jacob	377.5	462.56	6.09
Teñé	220	35	165	165	19/10/2012	3.9	75.25	128.75	12.05	Cooper-Jacob	1068.46	4456.61	27.01

Tabla 5.3. Valores utilizados para la interpretación de la conductividad hidráulica por métodos analíticos.

Enseguida se presentan los resultados de los mismos datos de bombeo interpretados mediante el método de Rushton, así como el tipo de acuífero deducido de este método.

Nombre del pozo	Funcionamiento conceptual del acuífero	Kx [m/d]	Ky [m/d]	Coef. de almacenamiento	Rendimiento específico
Bojay	Libre	1.41	1.41	0.03	0.1
Tlahuelilpan	Semiconfinado	3.03	3	0.00006	0.1
Tecocalco 1	Semiconfinado	0.68	0.68	0.00085	0.095
Mangas 5	Semiconfinado	4.8	0.3	0.0009	0.1
Teocalco 5	Semiconfinado	132	132	0.000063	0.001
5 - Sistema 1	Semiconfinado	11	0.5	0.0006	0.1
6 - Sistema 1	Semiconfinado	19.5	5	0.0003	0.1
Mangas 7	Semiconfinado	3.42	0.5	0.003	0.1
Teocalco 7	Semiconfinado	24	6.5	0.00006	0.07
Mangas 9	Semiconfinado	5.1	0.5	0.0004	0.08
9 - Sistema 2	Semiconfinado	7.3	7.3	0.00012	0.08
Mangas 11	Semiconfinado	4.45	4.45	0.00015	0.1
Teocalco 11	Semiconfinado	2.05	0.15	0.00009	0.1
Mangas 12	Semiconfinado	1.76	1.25	0.001	0.1
14 - Sistema 2	Semiconfinado	8.7	7.7	0.0062	0.1
Teocalco 15	Semiconfinado	4.68	0.4	0.00023	0.75
Teocalco 17	Semiconfinado	58	48	0.000018	0.1
Teocalco 19	Semiconfinado	5.25	3	0.00003	0.1
Teocalco 21	Libre	4.38	4.38	0.00018	0.1
Carbón Activado CFE	Libre	0.31	0.31	0.005	0.1
Los Cuates Bominthza	Semiconfinado	1.46	1.46	0.00002	0.1
Texas	Libre	0.95	0.95	0.0055	0.11
Tlamaco	Libre	1.31	1.31	0.0005	0.1
Cardonal	Libre	1.05	1.05	0.0005	0.12
Atengo	Libre	10.2	10.2	0.0068	0.09
La Cantera	Libre	0.63	0.63	0.004	0.1
La Ranfla	Libre	4.5	4.5	0.005	0.1
Teñhé	Libre	6.2	6.2	0.0001	0.1

Tabla 5.4 Datos e interpretación de parámetros hidráulicos de cada prueba de bombeo

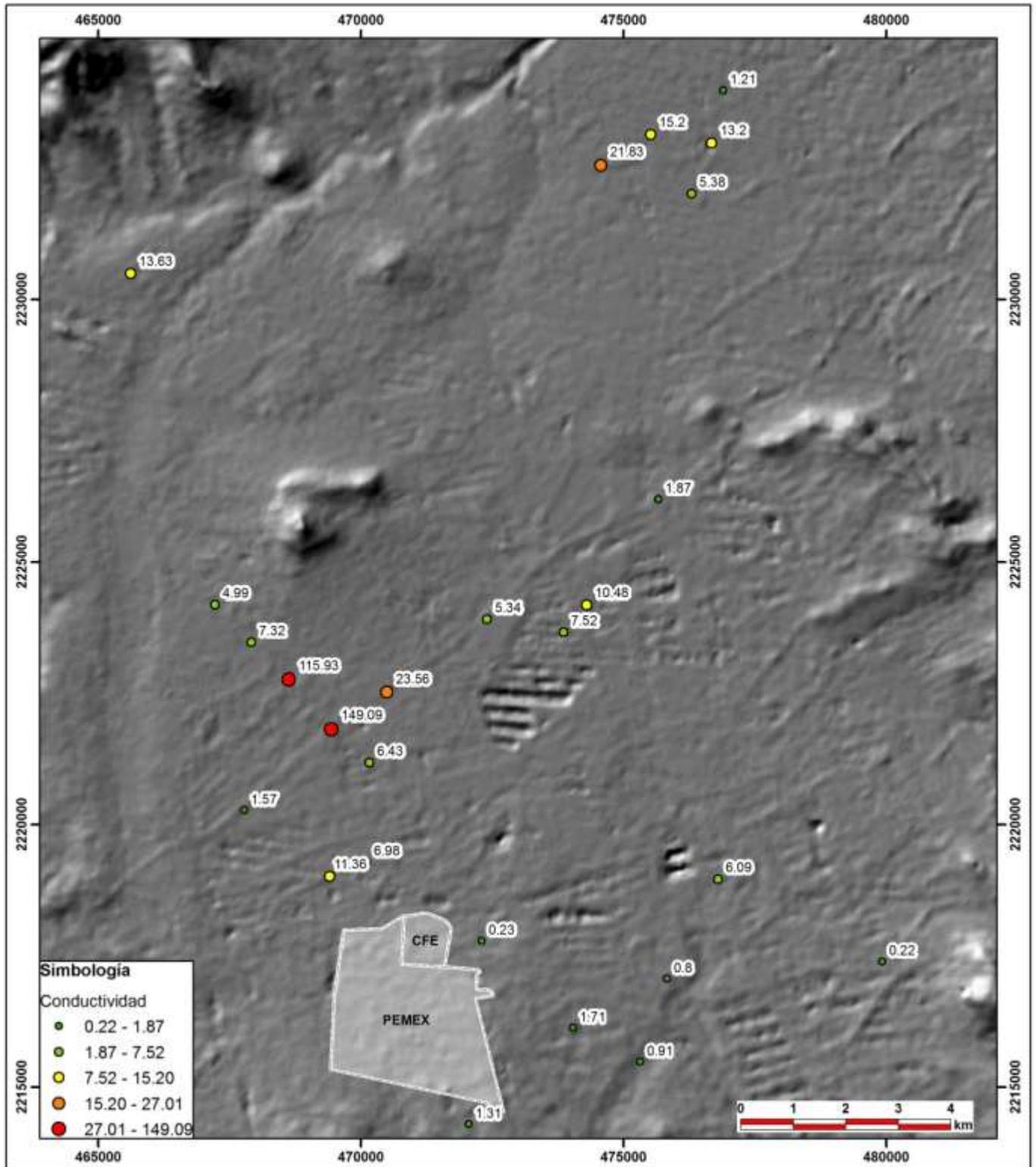


Figura 5.11 Valores de conductividad hidráulica

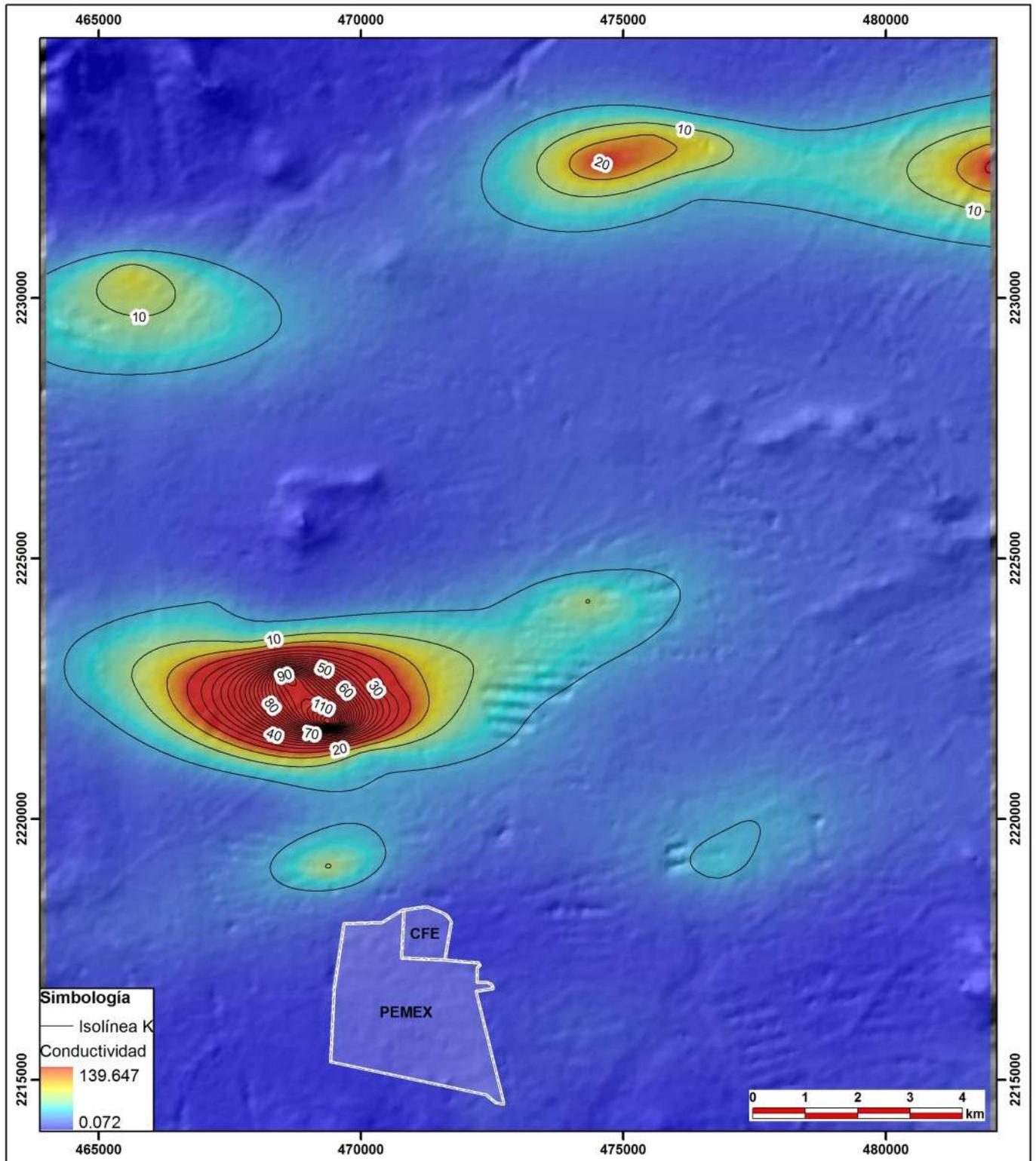


Figura 5.12 Valores de conductividad hidráulica

5.3.3 Geoquímica

Se evaluaron algunos parámetros geoquímicos para poder establecer una relación entre el agua de riego y el agua extraída de los pozos. Para ello se realizaron mapas que muestran la configuración de sólidos totales disueltos, nitratos y sulfatos. Estos parámetros son los más importantes en lo que se refiere a la calidad del agua para consumo humano.

En la figura 5.13 se observan los valores de sólidos totales disueltos. Éstos se compilaron a partir de la información recopilada inicialmente y correspondiente al año 2008. Ese año presentó el mayor número de valores continuos de los últimos 10 años. A esta base de datos se agregaron los medidos en campo. El hecho de que fueran de diferente año no influyó en el estudio, debido a que los valores no presentaron alguna variación importante.

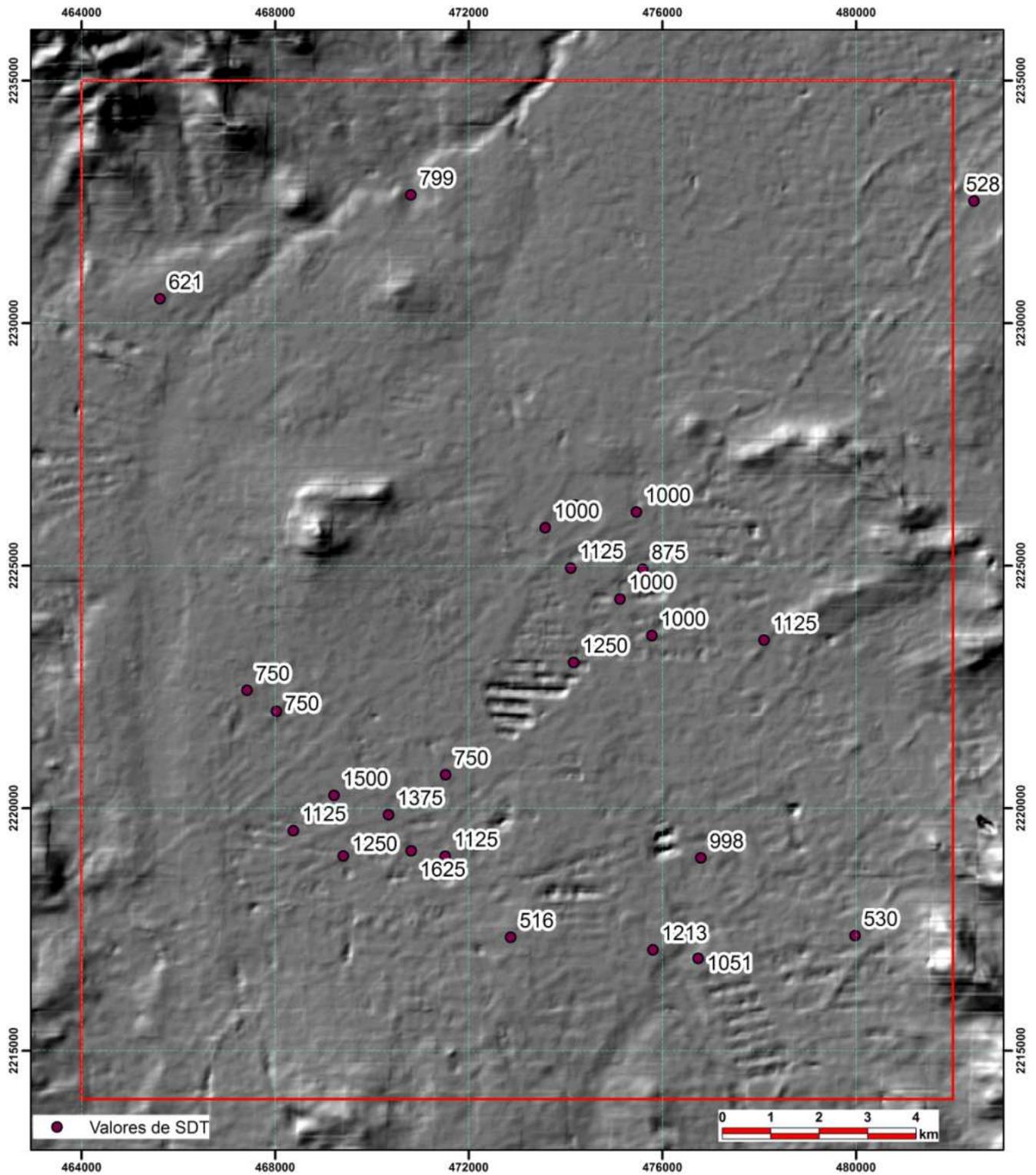


Figura 5.13 Valores de STD en ppm en el área de estudio

En la figura 5.14 se observa la configuración de los valores de STD de manera continua. Éstos se han clasificado con respecto a la NOM-127-SSA1-1994. Las curvas en color azul muestran zonas en las que se encuentran valores por encima de la norma (1000 ppm), éstas se concentran sobre todo en la porción SW en pozos del Sistema 1, en la porción SE en el pozo el Cardonal y Villas de Atitalaquia y en la porción central en pozos del Sistema 2.

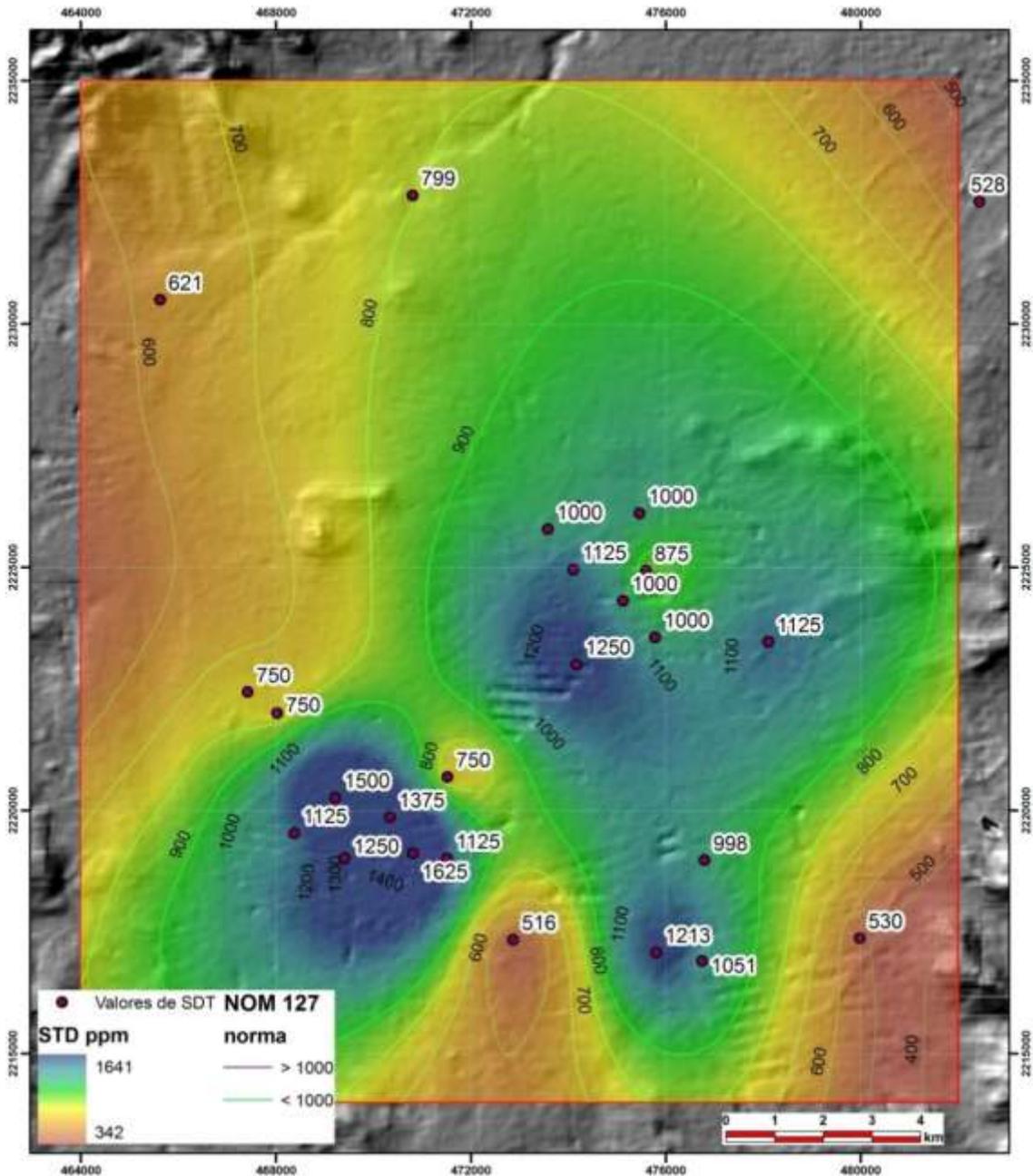


Figura 5.14. Configuración de los valores de STD

A continuación se muestra la configuración de los valores de nitratos del área (figura 5.15).

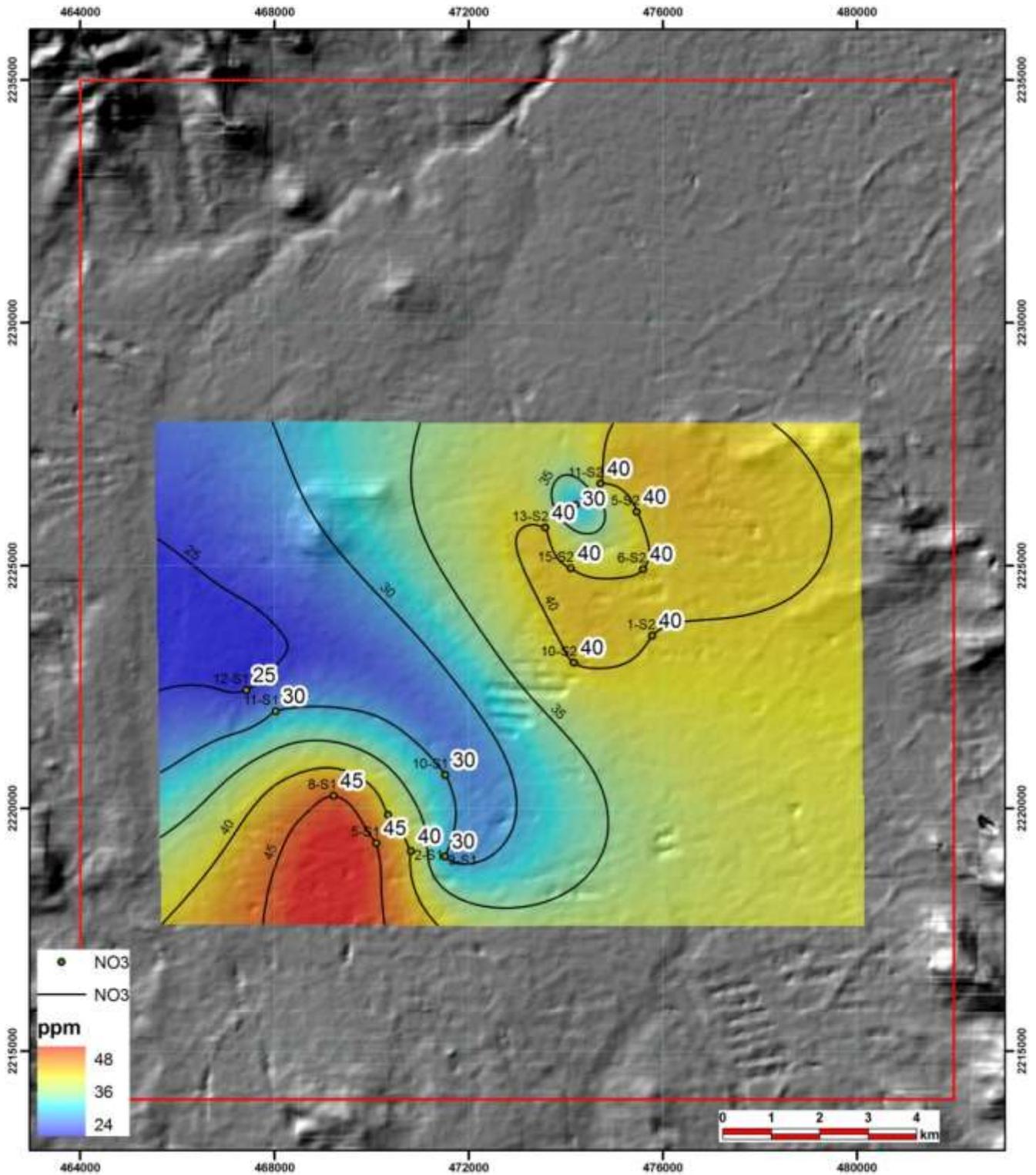


Figura 5.15. Configuración de los valores de nitratos para el área de estudio

5.4 SECCIONES

5.4.1 Sección geológica

En la figura 5.17 se muestra la sección geológica de dirección norte-sur de la zona del valle de Tula, que se utilizó como apoyo para la caracterización del acuífero en estudio. La traza de la sección geológica abarca 22 km de largo y se extiende a través del subsuelo hasta los 600 m de profundidad.

Se observa que el basamento de la zona de estudio se encuentra a una profundidad de aproximadamente 400 m a partir de la superficie topográfica, y está constituida por calizas pertenecientes a la *Formación El Doctor*, dicha unidad se encuentra altamente plegada, y presenta una serie de fallas normales, formando una cuenca sobre la que se encuentra el valle de Tula.

La *Formación Mexcala* se ubica sobreyaciendo a la *Formación El Doctor*, y se observa aflorando hacia la parte sur de la sección geológica a través de una falla de tipo normal con una dirección preferencial NW-SE, cuyos datos estructurales se desconocen.

Como consecuencia de la erosión de las rocas preexistentes se observa al *Grupo El Morro* (conglomerado calcáreo), el cual tiene un espesor aproximado de 100 m según lo reportado en la literatura.

Hacia la parte central del valle se observa una serie de fallas normales que generan un bajo estructural, las fallas funcionaron como zonas de debilidad que permitieron el ascenso de material magmático a través de dichas discontinuidades; el material magmático se acumuló sobre las formaciones *El Doctor*, *Mexcala* y *Grupo El Morro*.

En la parte norte de la sección se observa un cuerpo andesítico que es correlacionable con los eventos ocurridos después de la Orogenia Laramide.

Debido a la erosión de las rocas volcánicas depositadas se generaron sedimentos de granulometría fina (areniscas arcillosas), cubriendo toda el área de estudio. En

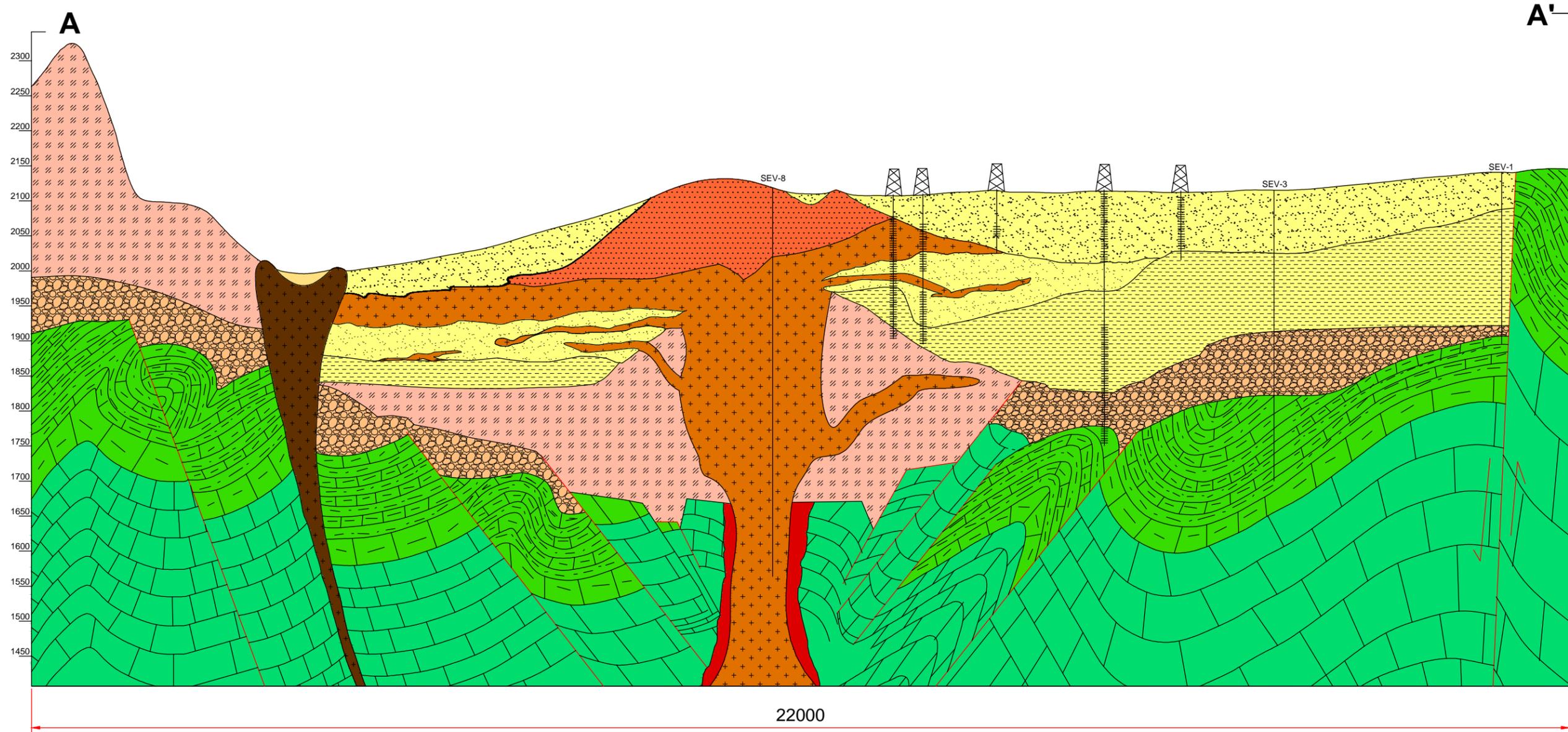
la sección se observan en color amarillo, y su espesor puede llegar hasta los 200 m.

Posteriormente, tienen lugar otro tipo de eventos que contribuyen al depósito de la Toba Don Guinyó, la cual forma el cerro Xicuco, y se observa en la sección en color rosa.

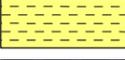
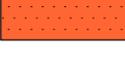
La *Formación San Juan* se encuentra en la sección intercalada con las tobas areno-arcillosas de la *Formación Tarango*, cuyos sedimentos son producto de la erosión de los aparatos volcánicos preexistentes, generando intercalación de sedimentos finos y gruesos, dicha unidad se observa en color amarillo y se encuentra cubriendo la mayor parte del área de estudio, presentándose incluso con espesores de hasta 200 metros.

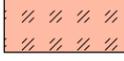
Finalmente se tiene la presencia de basaltos fisurales ubicados hacia la parte norte de la sección a lo largo del río Tula, éstos afloran debido a que la falla permitió la salida del material volcánico.

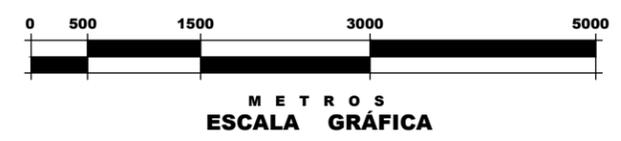
En cuanto a la geología estructural, se detecta un sistema de altos y bajos estructurales definidos por fallas de tipo normal, la inclinación de los planos de falla fue determinada con base en la información geofísica o inferida a partir del comportamiento y correlación estratigráfica. Los altos estructurales se ubican hacia los límites de la zona de estudio.



SECCIÓN

-  Basaltos Cuaternarios
-  Fm. Tarango (Tpt2)
-  Fm. Tarango (Tpt1)
-  Fm. San Juan
-  Fm. Don Guinyó

-  Fm. Pachuca
-  Grupo El Morro
-  Fm. Mexcala
-  Fm. El Doctor



 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	TÍTULO: Sección Geológica del Valle de Tula			
	ALUMNOS: JUÁREZ DE LEÓN CARLOS MENDEZ SOSA DIANA ITZEL			
	Figura 5.17			
ACADEMICO:	SUPERVISOR:	DIMENSIONES: METROS	FECHA: 01/SEP/2013	ESCALA: HOR. 1:60,000 VER. 1:6,000

5.4.2. Sección de flujo

En la parte somera de la sección (figura 5.18) se observan dos sistemas de flujo local que descargan en dos manantiales, hacia la parte central la descarga tiene lugar en el manantial *Cerrito Colorado*, y al norte en el manantial *Mangas*, ambos considerados como manantiales fríos.

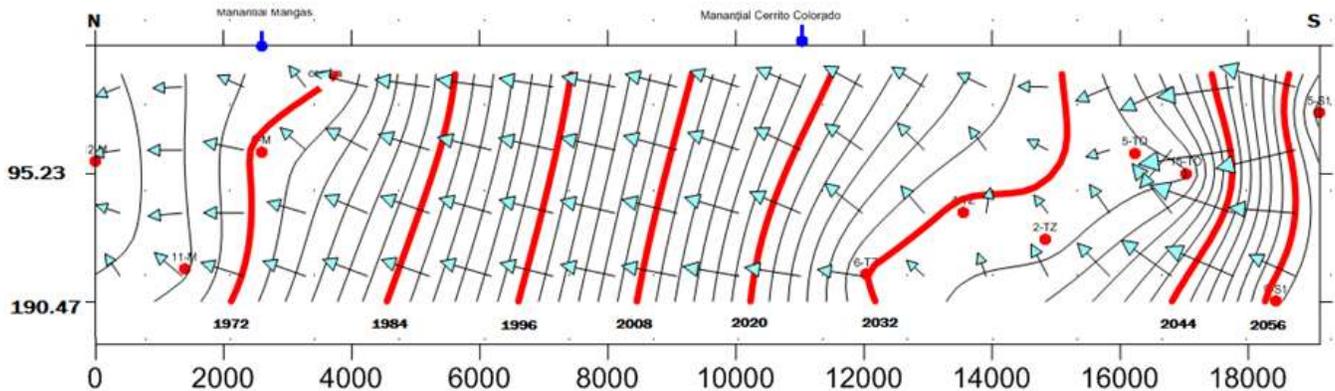


Figura 5.18. Sección esquemática del sistema de flujo

El sistema de flujo intermedio tiene una dirección dominante sur-norte, sin embargo se puede observar una tendencia de ascenso o descarga de las líneas de flujo en la zona de los pozos del sistema Teocalco, TO-5 y TO-15 al sur del área de estudio.

La zona donde el comportamiento de las líneas de flujo es deformado se ve influenciado por la presencia de una falla que genera un flujo vertical, provocando la salida de agua a través de un manantial termal *La Cantero*, además de la intensa extracción de agua subterránea a través de los pozos del Sistema 1; los cuales han cambiado parcialmente las condiciones naturales del flujo del agua subterránea en esta zona.

5.5. MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TULA

En la figura 5.19 se esquematiza el acuífero del valle de Tula, con la finalidad de entender su funcionamiento y cuyas características se describen a continuación.

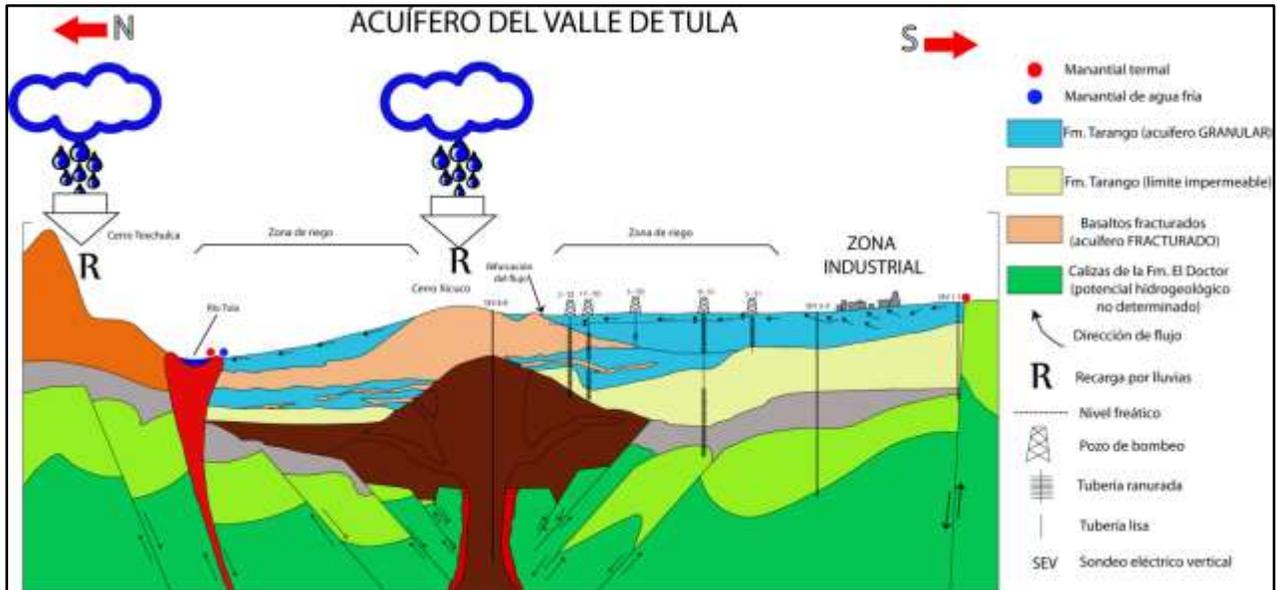


Figura 5.19 Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del acuífero del Valle de Tula

El acuífero se encuentra sobre una unidad impermeable constituida de tobas arcillosas, con un espesor aproximado de 200 metros, dicha unidad funciona como capa sello y permite la formación del acuífero.

Los derrames de basalto pertenecientes a la *Formación San Juan* (medio fracturado), intercalados con los depósitos de tobas areno-arcillosas de la *Formación Tarango* (medio granular), forman el sistema multi-acuífero, y son la principal fuente de agua subterránea en el valle de Tula, con un espesor no mayor a 200 m. Los basaltos aportan el mayor caudal de extracción, funcionando como la unidad hidrogeológica más productora del área de estudio (pozos con $Q \approx 80-100$ l/s).

La recarga en la zona de estudio se lleva a cabo a través de dos formas. La primera debido a la precipitación, ésta se realiza a través de la captación superficial de los cerros Texchulca, ubicado al norte del área de estudio, y Xicuco, ubicado casi al centro del valle, estos aparatos de origen volcánico permiten la infiltración del agua de lluvia a través de fracturas.

La segunda forma de recarga se da como consecuencia de los métodos de riego y el transporte de aguas residuales en los canales sin revestir, dicha recarga consiste en regar aproximadamente 95, 000 hectáreas, ésta es la principal fuente de recarga. Este fenómeno ha originado un cambio en el comportamiento hidráulico del acuífero, que pasa de semiconfinado a libre.

Las fallas funcionan como zonas de recarga y descarga del acuífero. Hacia la parte sur la falla normal ubicada cerca del manantial La Cantera funciona como una pequeña zona de descarga, en este caso de agua caliente. Hacia la zona norte la falla fisural ubicada a lo largo de la margen del río Tula funciona como salida del agua subterránea, tanto de agua fría, como caliente, la descarga del agua fría se genera debido a que los basaltos cuaternarios de dicha zona funcionan como barrera para el flujo local que va de sur a norte, ocasionando la aparición de manantiales a lo largo del río Tula, mientras que los manantiales termales se ven generados debido a la falla que sirve como salida para el sistema de flujo regional hasta alcanzar temperaturas cercanas a 40 °C.

En la zona de estudio encontramos manantiales asociados a un control estructural, como los mencionados en el párrafo anterior, y de origen natural, es decir, por el aumento del nivel freático las cargas hidráulicas superan en varios puntos el valor de la topografía, generando la salida de agua a través de manantiales de agua fría en la zona, como el de Cerro Colorado, Mangas y las descargas de San Salvador, éstos últimos también se deben al exceso de riego en la zona.

El acuífero es sometido a una intensa extracción por parte de la batería de pozos del Sistema 1 y Sistema 2 de la CFE, y por los sistemas Teocalco, Tezontepec y Mangas por parte de PEMEX.

La relación del volumen de entradas contra el de salidas da como resultado un incremento positivo en el almacenamiento del acuífero ($+\Delta V$).

El nivel del agua subterránea (PNE) presenta dos tendencias; una donde los niveles estáticos fluctúan entre 0 y 30 m y otra donde van de 40 m en adelante. La diferencia de niveles se ve influenciada debido a la litología, a través de la cual se extrae el agua, ya que los pozos que presentan un menor nivel obtienen agua de las tobas areno-arcillosas, y los más profundos de los basaltos. La litología clástica tiene mayor potencial de almacenamiento, y el nivel de abatimiento es menor con respecto a los basaltos. La zona con valores al NE menores coinciden con zonas donde el relleno de sedimentos clásticos es mayor, a diferencia de zonas aledañas que presentan niveles más profundos y su litología está dominada mayormente por basaltos fracturados. Otro factor importante que controla los niveles en la zona es la geología estructural, puesto que los paquetes rocosos se ven afectados por una serie de fallas normales que generan altos y bajos estructurales con niveles someros y profundos respectivamente.

El flujo subterráneo en forma general es de sur a norte, con una bifurcación a la altura del cerro Xicuco, en esta porción presenta una desviación al NE hacia Mangas y al NW hacia el río Tula. El comportamiento del flujo subterráneo se ve afectado en la parte sur del área de estudio por la presencia de una falla que genera un flujo vertical, además de la intensa extracción de agua subterránea que generan los sistemas de pozos por parte de la refinería "Miguel Hidalgo" y la central termoeléctrica (zona industrial), lo cual ha cambiado parcialmente las condiciones naturales del flujo del agua subterránea en esta zona.

Es posible que el sistema multiacuífero estudiado no sea el único, existe una probabilidad de que se tenga un acuífero profundo en un medio kárstico en las

calizas de la formación El Doctor. Sin embargo, dichos estudios aún no se han llevado a cabo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES

El análisis de toda la información vertida en este estudio, tanto recopilada como la obtenida en el trabajo de campo permitió conocer más detalladamente el funcionamiento hidráulico en el área de estudio.

Se concluye que se tiene un sistema multi-acuífero que se comporta de semiconfinado a libre. La parte granular cuenta con un espesor de 200 metros, resistividades de 27 a 98 $\Omega \cdot m$, conductividad hidráulica de 1 a 20 m/d, extracción promedio por pozo de 100 l/s y una recarga horizontal a través de acuíferos aledaños como consecuencia de infiltración de aguas negras mediante los canales sin revestir y el retorno por riego que generan valores de STD, que superan lo establecido por la NOM127 hacia la parte central sur. Se encontraron espesores considerables de basaltos fracturados (170 m), interdigitados en el paquete granular, éstos poseen una conductividad hidráulica que varía de 20 a 100 m/d, con un caudal de extracción por pozo aproximado de 100 l/s, y una recarga que proviene de la zona naturalmente fracturada lejana al área de estudio. Los caudales son similares para ambas unidades, sin embargo el espesor saturado es menor en los basaltos, lo cual los convierte en la unidad hidrogeológica más productora.

El flujo subterráneo, en forma general, es de sur a norte, cuyas entradas subterráneas están a la altura de los poblados de Bomintzhá y Tula de Allende, hasta llegar a una bifurcación subterránea a la altura del cerro Xicuco, donde finalmente descarga en un formato de sistema de flujo regional (Panuaya) y local hacia el noroeste en el río Tula. Por otro lado, se presentan descargas del flujo local en dirección noreste hacia el poblado de Mangas (pozos brotantes de San Salvador el Seco).

La diferencia del nivel estático en la zona se ve influenciada debido a la litología a través de la cual se está extrayendo el agua. Los pozos que presentan un nivel estático somero obtienen el agua de las tobas areno-arcillosas, y los más

profundos de los basaltos. Otro factor importante que controla los niveles en el área es la geología estructural, pues los paquetes rocosos se ven afectados por una serie de fallas geológicas que generan altos y bajos estructurales.

El fenómeno de la recarga incidental ha provocado un incremento en la variación del espesor saturado; como consecuencia existen descargas en forma de manantiales (Cerro Colorado, Mangas, Puedhé, etcétera). Algunas de las descargas naturales son de aguas termales y se asocian a fallamiento.

6.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La información de los censos realizados en años anteriores no esta disponible, por lo que es importante realizar un nuevo censo que permita actualizar la base de datos existente.

Se debe hacer una integración de toda la información hidrogeológica existente con los factores principales, entre ellos los usuarios que extraen agua para consumo humano, uso agrícola, caudal de extracción, nivel estático, nivel dinámico, parámetros químicos, ubicación, etcétera. Es recomendable almacenarlos en una geodatabase para su visualización en un sistema de información geográfico.

Se sugiere la perforación de tres enjambres de pozos a diferentes profundidades (figura 6). Uno al sur, cerca de la zona industrial P1(X: 473478; Y:2216782), un segundo hacia la zona central-este P2(X:474559; Y: 2225011) y el tercero ubicado a un kilómetro y medio en dirección norte del segundo enjambre P3(X:474619; Y:2226423). Se deberán perforar en un mismo punto con la finalidad de analizar las unidades granulares, fracturadas y calcáreas para comparar la diferencia de presiones y poder distinguir los diferentes sistemas de flujo que existen; se recomienda tomar muestras de agua de los tres acuíferos (si es el caso) y realizar estudios de hidrogeoquímica.

REFERENCIAS

Bibliográficas

Ángeles-Aquino, F. J., *Estudio Geológico de Tula, Hidalgo (Zona Arqueológica)*, Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, México, D.F., 1975.

Ibáñez Martínez, Javier Alexander, *Estudio geofísico de resistividad para evaluar el impacto ambiental del subsuelo en el relleno sanitario de nogales, Sonora*, Tesis de grado, México, 2009.

Jiménez, Blanca, *The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys: The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, p.5, en http://rosenberg.ucanr.org/documents/argentina/B_Jimenez_Final%20.pdf.

Mendoza Escobedo, Jesús Alfredo, *Informe trimestral del estudio geohidrológico para determinar la evolución de la calidad química del acuífero que abastece a la Central Termoeléctrica Tula, revisado por Sergio A. Flores Castro*, Comisión Federal de Electricidad, subdirección de construcción, gerencia de ingeniería civil, subgerencia de estudios geológicos, departamento de geohidrología, residencia de estudios geohidrológicos, México, D.F., 1990.

Rocha, R., *Estudio preliminar geohidrológico del Valle de Tula, Edo. De Hidalgo: México, D.F.* Tesis de licenciatura, Instituto Politécnico Nacional, 1983.

Vázquez, Palomera, "Mapa geológico de la región", Comisión Federal de Electricidad, Subdirección Técnica, Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, Subgerencia de Estudios Geológicos, Departamento de Geohidrología, 1996.

Hemerográficas

Chávez, A., C., Maya, C., *et al.*, “The removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico”, en *Environmental Pollution*, vol. 159, 2011, pp. 1354-1362.

Gibson, R., J. C., Durán-Álvarez, *et al.*, “Accumulation and leaching potential of some pharmaceuticals and potential endocrine disruptors in soils irrigated with wastewater in the Tula Valley, Mexico”, en *Chemosphere*, vol. 81, 2010, pp. 1437-1445.

Jiménez, B., “The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys”, en *The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, pp. 24.

Martínez-Carrillo, M. A., C., Solís, *et al.*, “Atmospheric elemental concentration determined by particle-induced X-ray emission at Tlaxcoapan in central Mexico, and its relation to Tula industrial-corridor emissions”, en *Microchemical Journal*, vol. 94, 2010, pp. 48-52.

Montelongo-Casanova, R., A. J., Gordillo-Martínez, *et al.*, “ Modelación de la calidad del agua del río Tula, Estado de Hidalgo, México”, en *Dyna*, vol. 75, núm. 154, Universidad Nacional Autónoma de Colombia Medellín, Colombia, marzo 2008, pp. 5-18

Reyes-Solís, I. E., C., Solís, *et al.*, “ Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission”, en *Microchemical Journal*, vol. 91, 2009, pp. 129-132.

Traducción y redacción basadas en los artículos: B., Jiménez, Chávez, A., “Quality assessment a potential use of an aquifer recharged with wastewater: El Mezquital case”, en *Water Science and Techonology*, 2004,

p. 8. y B., Jiménez, "The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys", en *The Megalopolis needs Mega solutions*, University of California Agriculture and Natural Resources, 2004, p. 24.

Páginas digitales

Fernández, Emilio, <<http://movil.eluniversaledomex.mx/otros/nota31388.html>>, visitado el 3 de junio de 2013.

< <http://poliyacimientos.blogspot.mx/2010/11/ley-de-darcy.html>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

<<http://www.ineg.pt/download/3056/fig3.jpg>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

<https://www.google.com/search?q=agua+en+el+subsuelo&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=SvgLUpnMPIP2gWO14CICw&ved=0CAkQ_AUoAQ&biw=1241&bih=567&sei=TPgLUtOwJlbq2AXD64HYAQ#bav=on.2,or.r_qf.&fp=82ac81df6154464b&q=nivel+piezometrico&sa=1&tbm=isch&facrc=_&imgdii=_&imgsrc=6RtokmzUaeKFvM%3A%3BxqnhV9tH03luyM%3Bhttp%253A%252F%252Fpendientedemigracion.ucm.es%252Finfo%252Fdiciex%252Fproyectos%252Fagua%252Fimagenes%252Fimagenes_web%252Facuifero_15.JPG%3Bhttp%253A%252F%252Fpendientedemigracion.ucm.es%252Finfo%252Fdiciex%252Fproyectos%252Fagua%252Fesc_sub_acuifero.html%3B396%3B218>, visitado el 17 de agosto de 2013.

<<http://es.envirotecnics.com/pwimg-producte-800-1-0/interfasemeter.jpg>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

< <http://mibexltda.com/geofisica/geofisica-sondeos-electricos-verticales/>>, visitado el 17 de agosto de 2013.

Informes

Cna, Bgs, Lshtm and Ub, *Effects os wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State*, BGS Technical Report WC/98/42, final report, Mexico, November 1998.

Comisión Federal de Eleccricidad, *Texto geología, 1996*.

Comisión Nacional del Agua, *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, 2007*.

ANEXO 1



BASE PIEZOMÉTRICA KMZ

#	POZO	X	Y	Tipo	PNE2012
1	CFE1-10	471523.448895	2220687.984181	Pozo	15.75
2	CFE1-11	468026.558391	2221997.824074	Pozo	22.90
3	CFE1-12	467420.513893	2222431.858959	Pozo	22.15
4	CFE1-13	466754.102067	2223102.418628	Pozo	22.57
5	CFE1-14	467425.922698	2221428.955095	Pozo	24.27
6	CFE1-15	466769.861366	2221974.111259	Pozo	29.44
7	CFE1-2	470814.527840	2219119.670138	Pozo	8.26
8	CFE1-3	471514.793606	2219010.689717	Pozo	8.20
9	CFE1-4	471608.720433	2219715.897727	Pozo	10.00
10	CFE1-5	470100.349174	2219283.484918	Pozo	7.00
11	CFE1-6	469407.857973	2219014.522636	Pozo	3.65
12	CFE1-8	469216.658340	2220261.263281	Pozo	22.67
13	CFE1-9	470343.381402	2219862.013292	Pozo	6.96
14	CFE2-10	474165.627291	2223003.721686	Pozo	16.35
15	CFE2-11	474715.032587	2226684.449385	Pozo	42.90
16	CFE2-12	474201.971146	2226246.800279	Pozo	43.20
17	CFE2-13	473579.595751	2225780.118457	Pozo	44.70
18	CFE2-14	474301.012933	2224180.490386	Pozo	4.09
19	CFE2-15	474106.442861	2224948.097672	Pozo	2.34
20	CFE2-1	475781.393459	2223556.145193	Pozo	6.70
21	CFE2-2	478100.183699	2223465.706969	Pozo	9.40
22	CFE2-3	478557.145454	2222705.693870	Pozo	15.84
23	CFE2-4	475189.861827	2225288.426366	Pozo	4.40
24	CFE2-5	475462.279503	2226107.105017	Pozo	44.23
25	CFE2-6	475594.052738	2224926.468941	Pozo	4.69
26	CFE2-7	475122.654576	2224309.808210	Pozo	10.13
27	CFE2-8	476076.448733	2224312.736296	Pozo	7.60
28	CFE2-9	473858.570243	2223666.366065	Pozo	13.80
29	11	472095.667115	2233518.476163	Manantial	0.00
30	143	471727.834072	2247408.191014	Pozo	57.21
31	16	470933.390142	2232392.258791	Manantial	2.85
32	18	464602.000000	2230975.000000	Manantial	9.00
33	185	480858.601973	2244383.087483	Pozo	84.25
34	LaCantera	467803.550000	2216125.410000	Manantial	0.00

#	POZO	PNE1996	PNE1997	PNE2000	PNE2001	PNE2002	PNE2003	PNE2004	PNE2005
1	CFE1-10	15.73	-	15.34	15.38	15.73	15.68	14.93	14.49
2	CFE1-11	20.67	-	21.32	21.51	21.39	21.31	20.89	20.82
3	CFE1-12	21.62	-	22.09	22.52	22.21	22.62	22.28	21.93
4	CFE1-13	22.65	-	22.76	23.12	22.87	22.81	22.85	22.81
5	CFE1-14	19.58	-	20.43	22.21	22.48	20.86	21.22	22.38
6	CFE1-15	30.90	-	31.71	31.53	31.28	30.01	30.19	31.81
7	CFE1-2	9.34	-	7.44	7.26	7.49	7.63	7.25	6.80
8	CFE1-3	10.05	-	7.25	7.09	7.79	7.59	7.09	6.91
9	CFE1-4	9.10	-	8.16	8.66	9.16	9.69	8.04	8.12
10	CFE1-5	8.85	-	7.27	6.97	7.42	7.65	6.79	6.42
11	CFE1-6	4.92	-	3.79	3.50	3.86	4.05	3.53	3.15
12	CFE1-8	12.55	-	10.62	16.24	18.46	15.24	16.27	15.55
14	CFE1-9	6.78	-	7.12	7.96	8.81	9.32	7.73	8.29
15	CFE2-10	15.35	14.93	16.34	14.81	16.37	21.49	16.17	16.92
16	CFE2-11	-	-	45.00	45.21	45.32	45.27	45.10	44.61
17	CFE2-12	41.52	-	43.16	43.39	43.41	43.24	43.37	42.74
18	CFE2-13	27.67	-	45.26	43.58	42.20	42.61	46.62	44.89
19	CFE2-14	3.75	-	4.13	4.26	3.93	3.99	3.88	3.84
20	CFE2-15	2.54	-	3.65	4.55	3.90	3.80	3.67	3.89
21	CFE2-1	5.08	-	7.35	4.47	5.96	7.42	7.65	5.69
22	CFE2-2	9.62	-	11.48	12.60	11.74	12.28	12.11	9.64
23	CFE2-3	23.53	-	21.63	20.81	20.95	20.24	19.36	17.95
24	CFE2-4	3.32	-	3.99	4.76	3.81	3.95	3.65	2.89
25	CFE2-5	43.31	-	44.68	44.38	44.41	44.06	44.06	43.35
26	CFE2-6	2.84	-	4.68	5.92	4.83	4.93	4.53	3.75
27	CFE2-7	8.59	-	10.31	11.09	10.09	10.41	9.92	9.22
28	CFE2-8	6.38	-	7.55	8.31	7.83	7.59	5.80	6.93
29	CFE2-9	14.74	-	14.69	14.90	14.63	14.52	14.61	14.34

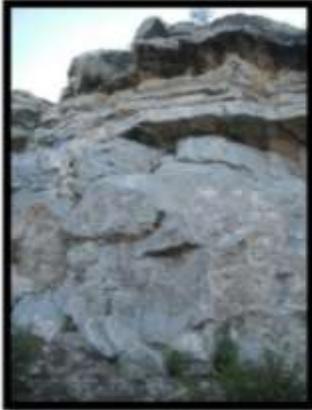
#	POZO	PNE2006	PNE2007	PNE2008	PNE2009	PNE2010
1	CFE1-10	14.54	14.84	14.32	13.87	15.33
2	CFE1-11	21.05	20.98	21.03	21.03	21.17
3	CFE1-12	22.18	21.73	21.91	21.81	22.06
4	CFE1-13	22.85	23.14	22.81	22.63	22.88
5	CFE1-14	22.45	22.89	20.78	20.47	22.61
6	CFE1-15	31.19	31.21	31.02	30.85	32.25
7	CFE1-2	6.83	7.54	6.73	5.35	6.84
8	CFE1-3	6.47	7.37	6.63	5.16	6.92
9	CFE1-4	8.12	7.84	7.06	6.67	8.33
10	CFE1-5	6.79	6.86	6.20	5.77	6.68
11	CFE1-6	3.50	3.71	3.15	2.81	3.76
12	CFE1-8	13.27	23.77	12.04	11.34	14.19
13	CFE1-9	7.40	7.65	6.17	6.54	9.00
14	CFE2-10	15.73	16.83	16.31	15.71	13.85
15	CFE2-11	44.44	43.86	44.08	44.09	44.92
16	CFE2-12	42.62	42.66	42.52	42.48	42.63
17	CFE2-13	44.66	44.17	44.86	44.29	44.06
18	CFE2-14	3.80	3.79	3.70	3.61	3.79
19	CFE2-15	3.26	2.77	2.75	2.48	2.53
20	CFE2-1	4.90	5.57	5.35	4.74	4.49
21	CFE2-2	9.37	9.37	11.35	7.85	10.15
22	CFE2-3	16.49	17.35	16.47	15.65	15.66
23	CFE2-4	2.93	3.22	2.14	1.43	1.79
24	CFE2-5	43.39	42.97	43.14	42.79	43.19
25	CFE2-6	3.72	3.77	3.25	2.33	2.61
26	CFE2-7	9.26	9.42	8.54	7.85	8.26
27	CFE2-8	6.84	7.01	6.61	5.55	5.99
28	CFE2-9	14.28	14.36	14.44	14.56	14.53

#	POZO	X	Y	Tipo	PNE2012
29	SinNombre	478599.700000	2208838.500000	Pozo	72.50
30	21	475320.000000	2215487.000000	Pozo	76.96
31	22	475830.000000	2217070.000000	Pozo	32.90
32	La Cantera	479922.000000	2217397.000000	Pozo	32.51
33	284	484192.049668	2242412.349390	Pozo	65.53
34	Panuaya	471347.665338	2233355.571511	Manantial	0.00
35	302	477528.000000	2225635.800000	Pozo	70.70
36	304	478632.147427	2226310.677751	Pozo	100.88
37	306	474312.000000	2220914.000000	Pozo	64.65
38	314	460208.236696	2231507.402674	Pozo	20.34
39	322	478158.000000	2216577.000000	Pozo	15.00
40	356	480939.468106	2238819.058699	Pozo	65.10
41	359	484886.593565	2240598.071165	Pozo	35.08
42	36	465624.000000	2230494.000000	Pozo	38.16
43	38	466747.000000	2217910.000000	Pozo	21.74
44	407	478683.210000	2210330.190000	Pozo	55.95
45	411	474863.860000	2210269.760000	Pozo	40.69
46	452	479984.000000	2215572.000000	Pozo	52.79
47	492	478222.039638	2223390.932447	Pozo	22.00
48	493	478772.851064	2222652.505907	Pozo	49.90
49	503	460558.000000	2229613.000000	Pozo	48.68
50	506	475158.000000	2217375.000000	Pozo	36.43
51	La Ranfla	476798.000000	2218964.000000	Pozo	3.99
52	527	471217.120000	2200029.500000	Pozo	77.97
53	529	465863.397492	2213722.096499	Pozo	3.95
54	532	459831.340000	2206119.430000	Pozo	41.04
55	537	490208.680000	2203137.190000	Pozo	61.95
56	547	485031.000000	2211186.000000	Pozo	56.18
57	Te±he	482420.000000	2232519.000000	Pozo	75.25
58	CFE1-7	468451.417201	2220270.270639	Pozo	8.40
59	Noria Texas	478924.000000	2214231.000000	Pozo	7.55
60	Villas de Atitalaquia	476741.000000	2216904.000000	Pozo	5.44
61	Zihuatanejo	472868.000000	2217337.000000	Pozo	105.08
62	513	474036.178636	2216137.974019	Pozo	107.10

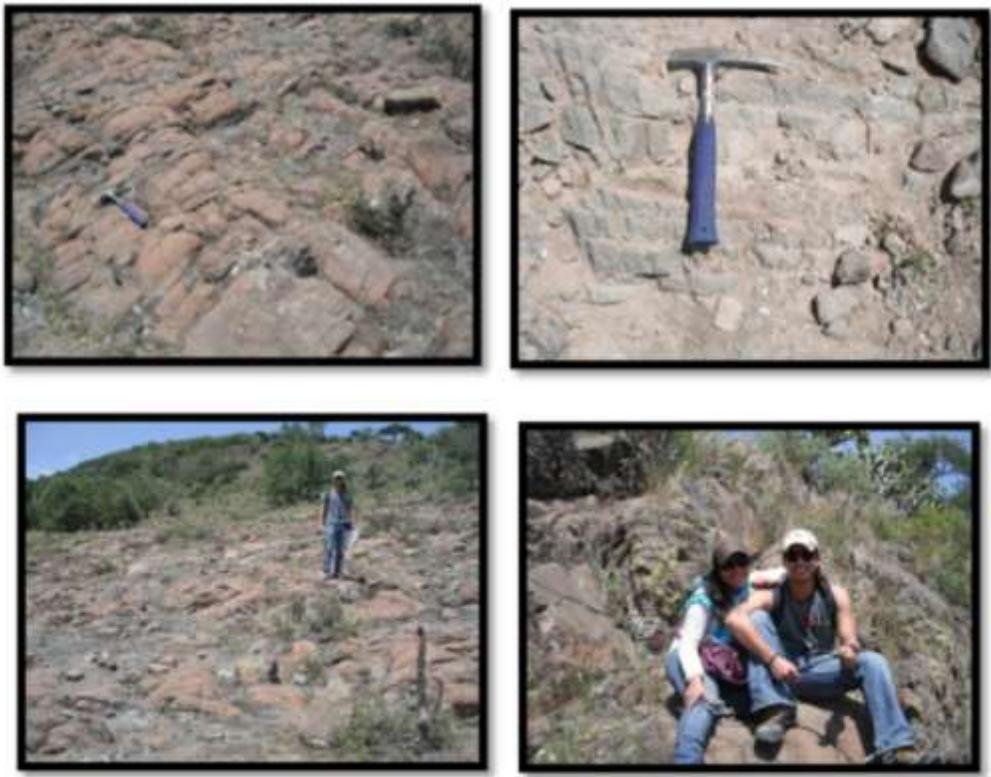
#	POZO	X	Y	Tipo	PNE2012	PNE1995
63	MAN-PEMEX-11	476679.589223	2232981.382014	Pozo	20.22	-
64	MAN-PEMEX-12	476902.102001	2233983.436751	Pozo	20.92	-
65	MAN-PEMEX-5	474570.775196	2232556.322663	Pozo	13.17	14.19
66	MAN-PEMEX-6	475469.642388	2232206.199825	Pozo	19.50	-
67	MAN-PEMEX-7	476297.766889	2232011.732898	Pozo	10.22	-
68	MAN-PEMEX-9	475518.477977	2233137.753770	Pozo	22.90	22.75
69	TEO-PEMEX-11	472404.861844	2223913.995118	Pozo	7.34	-
70	TEO-PEMEX-17	468628.516505	2222762.494364	Pozo	19.57	19.14
71	TEO-PEMEX-19	467921.511378	2223472.419562	Pozo	19.24	-
72	TEO-PEMEX-21	467227.124265	2224187.816754	Pozo	21.76	20.84

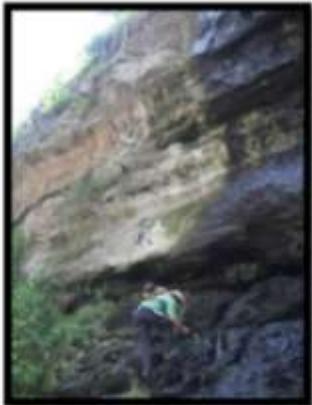
#	POZO	PNE1996	PNE1997	PNE2000	PNE2001	PNE2002	PNE2003	PNE2004
63	MAN-PEMEX-11	21.30	-	20.87	21.47	22.44	21.92	22.01
64	MAN-PEMEX-12	22.42	21.45	22.66	24.02	25.14	24.47	24.07
65	MAN-PEMEX-5	13.58	-	-	15.96	15.21	14.93	15.14
66	MAN-PEMEX-6	18.98	19.30	19.90	19.76	20.05	19.84	20.08
67	MAN-PEMEX-7	16.77	-	16.07	17.75	17.32	16.80	16.85
68	MAN-PEMEX-9	22.67	-	22.16	22.53	22.93	23.18	22.83
69	TEO-PEMEX-11	6.58	-	7.21	7.87	7.13	6.97	6.94
70	TEO-PEMEX-17	19.27	-	-	-	19.58	19.43	19.44
71	TEO-PEMEX-19	19.01	-	20.60	-	19.33	19.16	19.28
72	TEO-PEMEX-21	21.64	-	21.56	22.08	23.98	23.80	23.03

#	POZO	PNE2005	PNE2006	PNE2007	PNE2008
63	MAN-PEMEX-11	22.76	23.56	-	19.18
64	MAN-PEMEX-12	24.84	25.48	-	20.15
65	MAN-PEMEX-5	15.18	15.45	13.51	14.00
66	MAN-PEMEX-6	19.69	20.13	18.20	19.02
67	MAN-PEMEX-7	16.82	17.47	-	16.19
68	MAN-PEMEX-9	23.73	24.54	-	22.22
69	TEO-PEMEX-11	7.03	6.86	-	7.04
70	TEO-PEMEX-17	19.31	19.47	-	19.20
71	TEO-PEMEX-19	19.11	19.09	-	18.83
72	TEO-PEMEX-21	22.54	22.70	21.40	24.29

PUNTO DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA No: 1	CLAVE DEL PUNTO: PVG-1
ESTADO: Hidalgo	COORDENADAS UTM (GPS)
LOCALIDAD Cerro de calizas en la zona Sur	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 475510 mE
	Y: 2214156 mN
	Z: 2182 msnm
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DEL PUNTO GEOLÓGICO	
COLOR: Gris al fresco	
GÉNESIS DE LA ROCA: Sedimentaria	
TEXTURA: No clástica	
CARACTERÍSTICAS: el afloramiento presenta una cabalgadura y estratos que van desde 4 cm a 1 m aproximadamente. Se tomó el siguiente dato a partir de un estrato: <p style="text-align: center;">Rumbo y echado: S23°E/35°</p>	
CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE CAMPO: Caliza fosilífera (Fm. El Doctor)	
FOTOGRAFÍAS DEL AFLORAMIENTO	
 	
Brecha de falla	
 	
Afloramiento de calizas	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA No: 2	CLAVE DEL PUNTO: PVG-2
ESTADO: Hidalgo	COORDENADAS UTM (GPS)
LOCALIDAD: Puente a Atotonilco	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 477732 mE
	Y: 2213814 mN
	Z: 2124 msnm
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DEL PUNTO GEOLÓGICO	
COLOR: Café claro con tonos rosados	
GÉNESIS DE LA ROCA: ígnea	
TEXTURA: Piroclástica	
CARACTERÍSTICAS: se encuentra poco consolidada y el tamaño de los granos va de pequeño a mediano.	
CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE CAMPO: Toba areno-arcillosa (Fm. Tarango)	
FOTOGRAFÍAS DEL AFLORAMIENTO	
 	
<p>Formación Tarango Corte carretero. Formación Tarango</p>	
	
Formación Tarango	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA No: 3	CLAVE DEL PUNTO: PVG-3
ESTADO: Hidalgo	COORDENADAS UTM (GPS)
LOCALIDAD Tezontepec de Aldama	ELIPSOIDE WGS84
Cerro Texchulca	X: 14Q 465087 mE
	Y: 2232673 mN
	Z: 2090 msnm
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DEL PUNTO GEOLÓGICO	
COLOR: Gris oscuro con tonos rojizos	
GÉNESIS DE LA ROCA: Ígnea extrusiva	
TEXTURA: Porfídica	
CARACTERÍSTICAS: rocas altamente fracturadas, dichas fracturas presentan una dirección preferencial N27°W/42°.	
CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE CAMPO: Andesitas (Fm. Pachuca)	
FOTOGRAFÍAS DEL AFLORAMIENTO	
	
Afloramiento de andesitas en el Cerro Texchulca.	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA No: 4	CLAVE DEL PUNTO: PVG-4
ESTADO: Hidalgo	COORDENADAS UTM (GPS)
LOCALIDAD Tezontepec de Aldama	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 471476 mE
	Y: 2233461 mN
	Z: 1980 msnm
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DEL PUNTO GEOLÓGICO	
COLOR: Gris oscuro; café claro con tonos rosados	
GÉNESIS DE LA ROCA: Ígnea	
TEXTURA: Afanítica; Piroclástica	
CARACTERÍSTICAS: contacto entre rocas basálticas y tobas areno-arcillosas pertenecientes a la Fm. Tarango, las cuales se ubicaban en la base del mismo.	
CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE CAMPO: Basaltos; tobas areno-arcillosas (Cuaternarios; Fm. Tarango)	
FOTOGRAFÍAS DEL AFLORAMIENTO	
 	
Contacto entre la Fm. Tarango y los basaltos	Estratificación cruzada
 	
Descarga de agua. Fm. Tarango.	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA No: 5	CLAVE DEL PUNTO: PVG-5
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Tezontepec de Aldama	COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 471227 mE
	Y: 2233420 mN
	Z:
DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DEL PUNTO GEOLÓGICO	
COLOR: Gris oscuro	
GÉNESIS DE LA ROCA: Ígnea extrusiva	
TEXTURA: Afanítica	
CARACTERÍSTICAS: rocas altamente fracturadas, las cuales se ubicaron en ambos lados del río. Estas evidencias sugieren la existencia de una falla a lo largo del río Tula.	
CLASIFICACIÓN LITOLÓGICA DE CAMPO: Basaltos (Cuaternario)	
FOTOGRAFÍAS DEL AFLORAMIENTO	
	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN DE SUELO No: 1	CLAVE DEL PUNTO: PVS-1
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Texas	COORDENADAS UTM (GPS)
	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 479227 mE
	Y: 2214977 mN
	Z: 2168 msnm

DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE SUELO

COLOR: café claro con tonos blancos
COMPOSICIÓN: carbonato de calcio
ESPESOR: 2 metros
CLASIFICACIÓN DE TIPO DE SUELO: Rendzina

FOTOGRAFÍAS



Punto de verificación de suelo cerca de la Noria Texas.

VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa

PUNTO DE VERIFICACIÓN DE SUELO No: 2	CLAVE DEL PUNTO: PVS-2
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Tlamaco	COORDENADAS UTM (GPS)
	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 479935 mE
	Y: 2217405 mN
	Z: 2106 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE SUELO	
COLOR: café claro con tonos blancos	
COMPOSICIÓN: carbonato de calcio	
ESPESOR: 2 metros	
CLASIFICACIÓN DE TIPO DE SUELO: Rendzina	
FOTOGRAFÍAS	
	
Punto de verificación de suelo cerca del Pozo Tlamaco.	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN DE SUELO No: 3	CLAVE DEL PUNTO: PVS-3
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Atitalaquia Unidad Habitacional Antonio Osorio de León	COORDENADAS UTM (GPS)
	ELIPSOIDE WGS84
	X: 14Q 473133 mE
	Y: 2217151 mN
	Z: 2132 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE SUELO	
COLOR: café claro con tonos blancos	
COMPOSICIÓN: carbonato de calcio	
ESPESOR: 1 metro	
CLASIFICACIÓN DE TIPO DE SUELO: Rendzina	
FOTOGRAFÍAS	
	
Punto de verificación de suelo cerca del pozo U.H. Antonio Osorio de León.	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN DE SUELO No: 4	CLAVE DEL PUNTO: PVS-4
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Tezontepec de Aldama	COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
	X: 464885 mE
	Y: 2232715 mN
	Z: 2084 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE SUELO	
COLOR: café oscuro	
COMPOSICIÓN: está constituido predominantemente por rodados de composición ácida (pómez).	
ESPESOR: 30 cm de espesor y va disminuyendo conforme aumenta la pendiente, hasta desaparecer por completo.	
CLASIFICACIÓN DE TIPO DE SUELO: Feozem	
FOTOGRAFÍAS	
	
Punto de verificación de suelo en el cerro Texchulca.	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa	

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 1		CLAVE DEL PUNTO: PVH-1
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Tlamanca		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 475316 mE
		Y: 2215496 mN
		Z: 2120 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Pozo profundo Tlamanca MZ100	FOTOGRAFÍAS
N.E.	84.86 m	
N.D.	109.44 m	
OBSERVACIONES: La bomba se encuentra a 115 m.		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 2		CLAVE DEL PUNTO: PVH-2
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Tlamanca		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14 Q 475325 mE
		Y: 2215326 mN
		Z: 2113 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	MZ 98 (noria) / 4465/ VIII.22307	FOTOGRAFÍAS
N.E.	44.65 m	 
N.D.	-	
OBSERVACIONES: Noria de 6 metros de diámetro		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 3		CLAVE DEL PUNTO: PVH-3						
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: San Salvador el Seco		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84						
		X: 14Q 498255 mE						
		Y: 2242217 mN						
		Z: 1944 msnm						
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO								
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE O CLAVE DEL POZO</td> <td>San Salvador el Seco</td> </tr> <tr> <td>N.E.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>N.D.</td> <td></td> </tr> </table>	NOMBRE O CLAVE DEL POZO	San Salvador el Seco	N.E.		N.D.			FOTOGRAFÍAS 
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	San Salvador el Seco							
N.E.								
N.D.								
OBSERVACIONES: Zona de descarga (manantiales) aproximadamente 50 lps.								
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa								

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 4		CLAVE DEL PUNTO: PVH-4						
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Atitalaquia		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84						
		X: 14Q 474023 mE						
		Y: 2216137 mN						
		Z: 2147 msnm						
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO								
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE O CLAVE DEL POZO</td> <td>Unidad Habitacional Antonio Osorio de León</td> </tr> <tr> <td>N.E.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>N.D.</td> <td>-</td> </tr> </table>	NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Unidad Habitacional Antonio Osorio de León	N.E.	-	N.D.	-		FOTOGRAFÍAS 
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Unidad Habitacional Antonio Osorio de León							
N.E.	-							
N.D.	-							
OBSERVACIONES:								
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa								

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 5		CLAVE DEL PUNTO: PVH-5
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: San José Bojay		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 478160 mE
		Y: 2216592 mN
		Z: 2124 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Bojay 1/ MZ-322/ el Tablón	FOTOGRAFÍAS
N.E.	15 m	
N.D.	70 m	
OBSERVACIONES: Caudal aproximado: 30 lps. Se reportó que el nivel dinámico no supera los 70 m de profundidad, aún después de años de bombeo constante.		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 6		CLAVE DEL PUNTO: PVH-6
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: San Gabriel		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 464603 mE
		Y: 2230977 mN
		Z: 2004 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	San Gabriel/MZ18/ MZ19	FOTOGRAFÍAS
N.E.	-	
N.D.	10.1 m	
OBSERVACIONES: Utilizando el medidor se obtuvo un gasto aproximado de 18 lps.		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 7		CLAVE DEL PUNTO: PVH-7						
ESTADO: Hidalgo		COORDENADAS UTM (GPS)						
LOCALIDAD: Binola		ELIPSOIDE WGS84						
		X: 14Q 464338 mE						
		Y: 2231408 mN						
		Z: 1992 msnm						
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO								
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE O CLAVE DEL POZO</td> <td>Binola</td> </tr> <tr> <td>N.E.</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>N.D.</td> <td>8 m</td> </tr> </table>		NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Binola	N.E.	-	N.D.	8 m	<p style="text-align: center;">FOTOGRAFÍAS</p>  <p style="text-align: center;">Tanque de almacenamiento</p>  <p style="text-align: center;">Pozo Binola</p>
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Binola							
N.E.	-							
N.D.	8 m							
<p>OBSERVACIONES: Caudal de extracción calculado por el tiempo que tarda en llenar un depósito cercano: 92 lps. Tubería de descarga: 2"</p>								
<p>VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa</p>								

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 8		CLAVE DEL PUNTO: PVH-8
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Tezontepec de Aldama		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 470806 mE
		Y: 2232646 mN
		Z: 2023 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Manantial el Puedhe/CNA VI-381-07	FOTOGRAFÍAS
N.E.	2.85 m	
N.D.		Tubería del manantial Puedhé
<p>OBSERVACIONES: Se realizó un cálculo preliminar del caudal de este manantial utilizando el diámetro de los tubos y el porcentaje de agua que sale de ellos. Se observó un tubo de 12", uno de 10", tres de 8" y uno de 2", con estos tubos se calculó un caudal aproximado de 315 lps.</p>		
		Interior de la tubería del manantial Puedhé
		
<p>VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa</p>		

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 9		CLAVE DEL PUNTO: PVH-9
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Tezontepec de Aldama		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 472341 mE
		Y: 2233740 mN
		Z: 2002 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Manantial Panuaya	FOTOGRAFÍAS
N.E.	-	
N.D.	-	
OBSERVACIONES: En este sitio se encontraron tanto manantiales termales como de agua fría. Se observó que existen dos sistemas de flujo, debido a que se tienen manantiales de agua caliente al nivel del río Tula a una distancia no mayor a 5 m. En éstos el agua se encuentra aproximadamente a 41°C. Los manantiales de agua fría, que representan el otro sistema de flujo se ubicaron en la parte superior del escarpe que contiene al río Tula.		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

Manantial termal Panuaya

PUNTO DE VERIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA No: 10		CLAVE DEL PUNTO: PVH-10
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Texas		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84
		X: 14Q 478924 mE
		Y: 2214231 mN
		Z: 2156 msnm
DESCRIPCIÓN DEL PUNTO HIDROGEOLÓGICO		
NOMBRE O CLAVE DEL POZO	Noria Texas	FOTOGRAFÍAS
N.E.	6.95	
N.D.	-	
OBSERVACIONES:		
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa		

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 1		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: TEXAS	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Texas		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84	
		X: 14Q0480008 mE	
		Y: 2215723 mN	
		Z: 2173 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de recuperación			
CAUDAL	8 l/s	ALTURA DEL BROCAL	0.40m MANGUERA 1.89m
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	53.42 m	PND	61.64 m
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	RECUPERACIÓN [m]	
0.00	61.24	7.82	
0.25	59.69	6.27	
0.50	58.81	5.39	
0.75	58.20	4.78	
1.00	57.86	4.44	
2.00	57.03	3.61	
4.00	56.21	2.79	
8.00	55.36	1.94	
15.00	54.56	1.14	
30.00	53.69	0.27	
45.00	53.20	0.22	
OBSERVACIONES GENERALES DE LA CAPTACIÓN Tubería de descarga 3"			
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 2		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: VILLAS DE ATITALAQUIA	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Atitalaquia		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84	
		X: 14Q0476741 mE	
		Y: 2216904 mN	
		Z: 2097 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	<input checked="" type="checkbox"/> POZO ENTUBADO	<input type="checkbox"/> POZO INACTIVO	<input type="checkbox"/> OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
<input type="checkbox"/> AGRÍCOLA	<input checked="" type="checkbox"/> CONSUMO HUMANO	<input type="checkbox"/> INDUSTRIAL	<input type="checkbox"/> DOM. <input type="checkbox"/> OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de recuperación			
CAUDAL	0.4 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE		PND	13.28 m
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	RECUPERACIÓN [m]	 
0.00	13.28	7.84	
0.25	13.20	7.76	
0.50	13.18	7.74	
0.75	13.11	7.67	
1.00	12.91	7.47	
2.00	12.86	7.42	
4.00	12.44	7.00	
8.00	11.57	6.13	
15.00	10.52	5.08	
30.00	7.52	2.08	
45.00	6.48	1.04	
58.00	6.06	0.62	
287.00	5.46	0.02	
480.00	5.44	0.00	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 3		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: Pozo Cardonal/VIII.23507	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD El Cardonal		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84	
		X: 14Q0475803 mE	
		Y: 2217077 mN	
		Z: 2120 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo			
CAUDAL	18 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA 39.5 cm
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	32.705 m	PND	
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	
0.00	32.71	0.00	
0.25	34.80	2.09	
0.75	37.05	4.34	
1.00	37.60	4.89	
1.33	38.35	5.64	
2.00	39.31	6.60	
4.00	40.84	8.13	
8.40	42.91	10.20	
11.00	43.10	10.39	
15.00	43.76	11.05	
20.00	44.39	11.68	
			30.00 45.20 12.49
			40.00 45.81 13.10
			45.00 46.13 13.42
			50.00 46.36 13.65
			60.00 46.73 14.02
			75.00 47.28 14.57
			90.00 47.74 15.03
			105.00 48.13 15.42
			120.00 48.48 15.77
			175.00 49.50 16.79
			296.00 51.40 18.70
			520.00 53.01 20.31
OBSERVACIONES GENERALES DE LA CAPTACIÓN Se reportan valores de arsénico			
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			



FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 4		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: Profundo Tlamaco	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Tlamaco		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84 X: 14Q0475316 mE Y: 2215496 mN Z: 2120 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo			
CAUDAL	20 l/s	ALTURA DEL BROCAL	20 cm
MANGUERA	96cm		
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	84.86 m	PND	109.24 m
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	 
0.00	84.86	0.00	
0.25	86.92	2.06	
0.50	88.34	3.48	
0.75	89.74	4.88	
1.17	91.14	6.28	
2.00	93.00	8.14	
4.00	94.81	9.95	
8.00	96.23	11.37	
15.00	98.32	13.46	
30.00	99.38	14.52	
45.00	100.48	15.62	
60.00	101.15	16.29	
75.00	102.68	17.82	
120.00	104.78	19.92	
OBSERVACIONES GENERALES DE LA CAPTACIÓN Tubería de descarga: 6". Bomba: 115 m.			
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 5		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: Santa María Nativitas Atengo																																																																															
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Atengo		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84																																																																															
		X: 14Q0465620 mE																																																																															
		Y: 2230500 mN																																																																															
		Z: 2048 msnm																																																																															
NATURALEZA DEL PUNTO																																																																																	
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO																																																																														
USO DE LA CAPTACIÓN																																																																																	
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO																																																																														
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo																																																																																	
CAUDAL	25 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA																																																																														
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)																																																																																	
PNE	36.49 m	PND																																																																															
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO [min]</th> <th>PND [m]</th> <th>ABATIMIENTO [m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>36.49</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.30</td><td>38.54</td><td>2.05</td></tr> <tr><td>0.52</td><td>38.60</td><td>2.11</td></tr> <tr><td>0.75</td><td>38.69</td><td>2.20</td></tr> <tr><td>1.00</td><td>38.76</td><td>2.27</td></tr> <tr><td>2.00</td><td>38.96</td><td>2.47</td></tr> <tr><td>3.00</td><td>39.10</td><td>2.61</td></tr> <tr><td>4.00</td><td>39.18</td><td>2.69</td></tr> <tr><td>5.00</td><td>39.25</td><td>2.76</td></tr> <tr><td>6.00</td><td>39.30</td><td>2.81</td></tr> <tr><td>7.00</td><td>39.35</td><td>2.86</td></tr> <tr><td>8.00</td><td>39.38</td><td>2.89</td></tr> <tr><td>10.00</td><td>39.43</td><td>2.94</td></tr> </tbody> </table>	TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	0.00	36.49	0.00	0.30	38.54	2.05	0.52	38.60	2.11	0.75	38.69	2.20	1.00	38.76	2.27	2.00	38.96	2.47	3.00	39.10	2.61	4.00	39.18	2.69	5.00	39.25	2.76	6.00	39.30	2.81	7.00	39.35	2.86	8.00	39.38	2.89	10.00	39.43	2.94	<table border="1"> <tbody> <tr><td>12.00</td><td>39.47</td><td>2.98</td></tr> <tr><td>15.00</td><td>39.53</td><td>3.04</td></tr> <tr><td>20.00</td><td>39.59</td><td>3.10</td></tr> <tr><td>30.00</td><td>39.58</td><td>3.09</td></tr> <tr><td>45.00</td><td>39.62</td><td>3.13</td></tr> <tr><td>60.00</td><td>39.71</td><td>3.22</td></tr> <tr><td>75.00</td><td>39.75</td><td>3.26</td></tr> <tr><td>90.00</td><td>39.77</td><td>3.28</td></tr> <tr><td>105.00</td><td>39.79</td><td>3.30</td></tr> <tr><td>617.00</td><td>40.12</td><td>3.63</td></tr> <tr><td>666.00</td><td>40.12</td><td>3.63</td></tr> <tr><td>709.00</td><td>40.12</td><td>3.63</td></tr> </tbody> </table>	12.00	39.47	2.98	15.00	39.53	3.04	20.00	39.59	3.10	30.00	39.58	3.09	45.00	39.62	3.13	60.00	39.71	3.22	75.00	39.75	3.26	90.00	39.77	3.28	105.00	39.79	3.30	617.00	40.12	3.63	666.00	40.12	3.63	709.00	40.12	3.63		
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]																																																																															
0.00	36.49	0.00																																																																															
0.30	38.54	2.05																																																																															
0.52	38.60	2.11																																																																															
0.75	38.69	2.20																																																																															
1.00	38.76	2.27																																																																															
2.00	38.96	2.47																																																																															
3.00	39.10	2.61																																																																															
4.00	39.18	2.69																																																																															
5.00	39.25	2.76																																																																															
6.00	39.30	2.81																																																																															
7.00	39.35	2.86																																																																															
8.00	39.38	2.89																																																																															
10.00	39.43	2.94																																																																															
12.00	39.47	2.98																																																																															
15.00	39.53	3.04																																																																															
20.00	39.59	3.10																																																																															
30.00	39.58	3.09																																																																															
45.00	39.62	3.13																																																																															
60.00	39.71	3.22																																																																															
75.00	39.75	3.26																																																																															
90.00	39.77	3.28																																																																															
105.00	39.79	3.30																																																																															
617.00	40.12	3.63																																																																															
666.00	40.12	3.63																																																																															
709.00	40.12	3.63																																																																															
																																																																																	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa																																																																																	

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 6		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: Zihuatanejo	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Atotonilco de Tula		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84	
		X: 14Q0472868 mE	
		Y: 2217337 mN	
		Z: 2132 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo			
CAUDAL	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA	
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	105.08 m	PND	
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENT O [m]	
0.00	105.08	0.00	
0.25	109.20	4.12	
0.50	112.41	7.33	
0.83	115.40	10.32	
1.02	117.22	12.14	
1.50	120.34	15.26	
2.03	123.43	18.35	
4.03	132.33	27.25	
8.00	141.17	36.09	
15.00	146.43	41.35	
30.60	148.99	43.91	
45.00	149.99	44.91	
292.00	157.47	52.39	
560.00	184.44	79.36	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 7		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: La Ranfla	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD: Atitalaquia		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84	
		X: 14Q0476796 mE	
		Y: 2218974 mN	
		Z: 2084 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo			
CAUDAL	25.67 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	3.99 m	PND	
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	
0.00	3.99	0.00	
0.25	6.22	2.23	
0.52	7.52	3.53	
0.88	7.97	3.98	
1.17	8.28	4.29	
2.00	8.71	4.72	
4.00	8.98	4.99	
8.00	9.44	5.45	
15.00	9.81	5.82	
30.00	9.93	5.94	
45.00	10.13	6.14	
80.00	10.09	6.10	
75.00	10.13	6.14	
90.00	10.20	6.21	
148.00	10.50	6.51	
416.00	10.79	6.60	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 8		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: La Cantera																																																			
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Atitalaquia		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84																																																			
		X: 14Q479981 mE																																																			
		Y: 2217371 mN																																																			
		Z: 2140 msnm																																																			
NATURALEZA DEL PUNTO																																																					
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO																																																		
USO DE LA CAPTACIÓN																																																					
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO																																																		
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo																																																					
CAUDAL	12 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA																																																		
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)																																																					
PNE	29.1 m	PND																																																			
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS																																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TIEMPO [min]</th> <th>PND [m]</th> <th>ABATIMIENTO [m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00</td><td>29.10</td><td>0.00</td></tr> <tr><td>0.50</td><td>31.99</td><td>2.89</td></tr> <tr><td>0.52</td><td>33.21</td><td>4.11</td></tr> <tr><td>3.10</td><td>38.32</td><td>9.22</td></tr> <tr><td>3.53</td><td>40.51</td><td>11.41</td></tr> <tr><td>4.00</td><td>41.19</td><td>12.09</td></tr> <tr><td>4.75</td><td>42.11</td><td>13.01</td></tr> <tr><td>6.37</td><td>43.49</td><td>14.39</td></tr> <tr><td>8.00</td><td>45.30</td><td>16.20</td></tr> <tr><td>15.00</td><td>48.09</td><td>18.99</td></tr> <tr><td>31.00</td><td>50.02</td><td>20.92</td></tr> <tr><td>45.00</td><td>50.62</td><td>21.52</td></tr> <tr><td>60.00</td><td>50.98</td><td>21.88</td></tr> <tr><td>90.00</td><td>51.40</td><td>22.30</td></tr> <tr><td>246.00</td><td>52.21</td><td>23.11</td></tr> <tr><td>513.00</td><td>52.50</td><td>23.40</td></tr> </tbody> </table>	TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	0.00	29.10	0.00	0.50	31.99	2.89	0.52	33.21	4.11	3.10	38.32	9.22	3.53	40.51	11.41	4.00	41.19	12.09	4.75	42.11	13.01	6.37	43.49	14.39	8.00	45.30	16.20	15.00	48.09	18.99	31.00	50.02	20.92	45.00	50.62	21.52	60.00	50.98	21.88	90.00	51.40	22.30	246.00	52.21	23.11	513.00	52.50	23.40		
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]																																																			
0.00	29.10	0.00																																																			
0.50	31.99	2.89																																																			
0.52	33.21	4.11																																																			
3.10	38.32	9.22																																																			
3.53	40.51	11.41																																																			
4.00	41.19	12.09																																																			
4.75	42.11	13.01																																																			
6.37	43.49	14.39																																																			
8.00	45.30	16.20																																																			
15.00	48.09	18.99																																																			
31.00	50.02	20.92																																																			
45.00	50.62	21.52																																																			
60.00	50.98	21.88																																																			
90.00	51.40	22.30																																																			
246.00	52.21	23.11																																																			
513.00	52.50	23.40																																																			
																																																					
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa																																																					

FICHA DE INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA No: 9		CLAVE O NOMBRE DEL POZO: Teñhé	
ESTADO: Hidalgo LOCALIDAD Mixquiahuala de Juárez		COORDENADAS UTM (GPS) ELIPSOIDE WGS84 X: 14Q0482438 mE Y: 2232515 mN Z: 2045 msnm	
NATURALEZA DEL PUNTO			
NORIA	POZO ENTUBADO	POZO INACTIVO	OTRO
USO DE LA CAPTACIÓN			
AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL	DOM. OTRO
TIPO DE PRUEBA: Prueba de Bombeo			
CAUDAL	128.75 l/s	ALTURA DEL BROCAL	MANGUERA
PROFUNDIDAD NIVEL DEL AGUA (m)			
PNE	75.25 m	PND	
MEDICIONES EN CAMPO		FOTOGRAFÍAS	
TIEMPO [min]	PND [m]	ABATIMIENTO [m]	
0:00	75.25	0.00	
0:25	84.50	9.25	
0:50	85.91	10.66	
0:83	86.20	10.95	
1:00	86.30	11.05	
2:00	86.76	11.51	
4:00	86.94	11.69	
6:00	86.96	11.71	
15:00	87.11	11.86	
30:00	87.15	11.90	
45:00	87.13	11.88	
60:00	87.21	11.96	
90:00	87.23	11.98	
120:00	87.27	12.02	
180:00	87.30	12.05	
234:14	87.26	12.01	
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León Diana Itzel Méndez Sosa			

DATOS GEOQUÍMICOS

Zihuatanejo	Villas de Atitalaquia	Santa María Atengo	Puedhé
7.08 pH	7.31 pH	7.29 pH	7.39 pH
29.79 °C	20 °C	21.37 °C	20.95 °C
790 mBar	789.1 mBar	792.3 mBar	800.1 mBar
970 Ω•cm	475 Ω•cm	805 Ω•cm	626 Ω•cm
1031 μS/cm	2107 μS/cm	1242 μS/cm	1598 μS/cm
516 tds ppm	1051 tds ppt	621 tds ppm	799 tds ppm
0.51 sal	1.08 sal	0.62 sal	0.81 sal
144 ORP	145.5 ORP	151 ORP	133.5 ORP
		2.87 DO ppm	4.62 DO ppm

El Cardonal	La Cantera	La Ranfla	Teñhé
7.54 pH	6.74 pH	6.87 pH	7.47 pH
24.3 °C	25.08 °C	20.45 °C	25.77 °C
788.8 mBar	783.3 mBar	789.9 mBar	794.2 mBar
400 Ω•cm	944 Ω•cm	532.2 Ω•cm	948 Ω•cm
2425 μS/cm	1059 μS/cm	1877 μS/cm	1055 μS/cm
1213 tds ppm	530 tds ppm	998 tds ppm	528 tds ppm
1.25 sal	0.52 sal	0.96 sal	151 ORP
78 ORP	207 ORP	129 ORP	11.3 OD ppm
		5.01 OD ppm	

FOTOGRAFÍAS



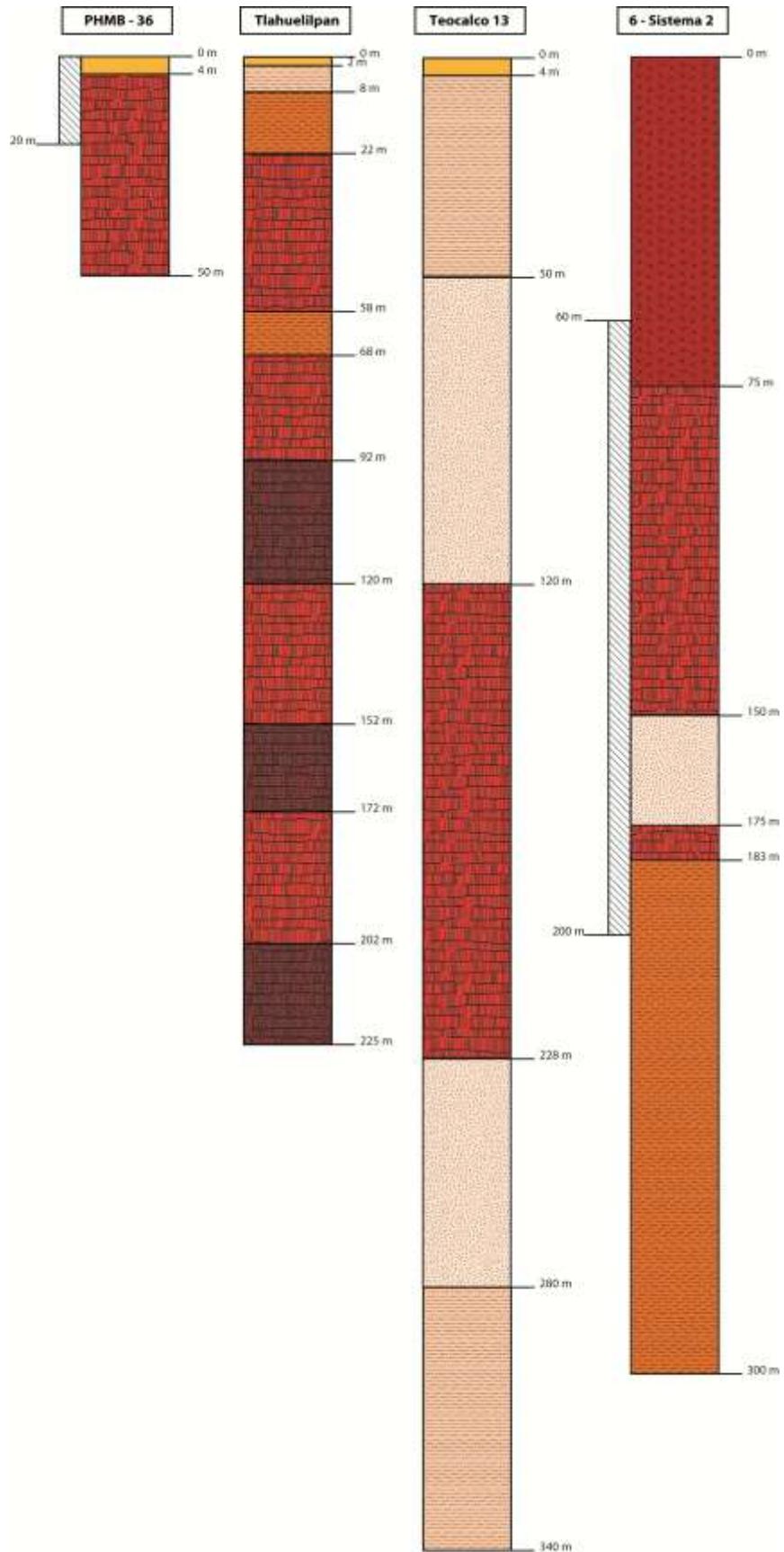
VERIFICÓ: Carlos Rufino Juárez de León
Diana Itzel Méndez Sosa

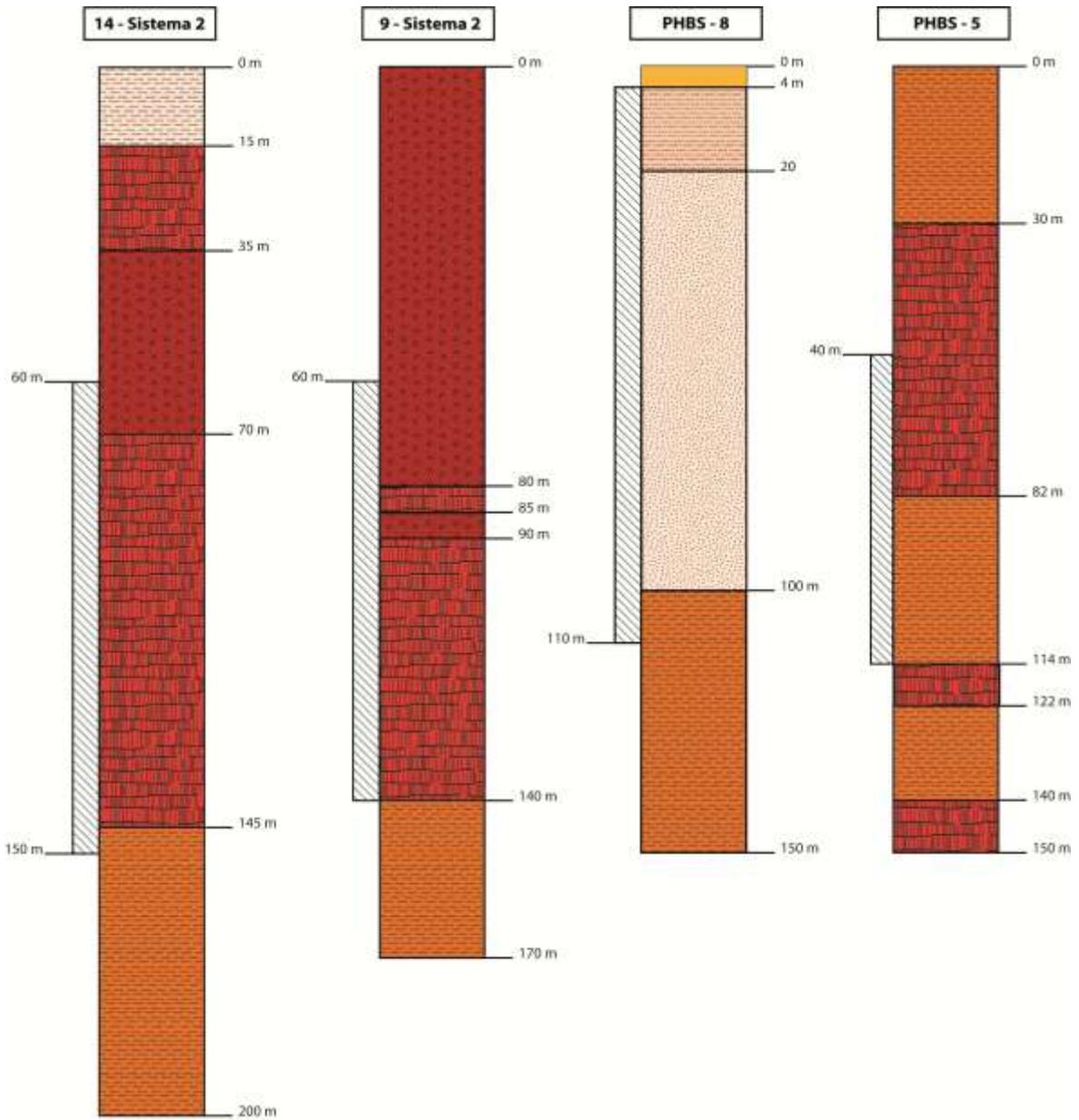
ANEXO 2

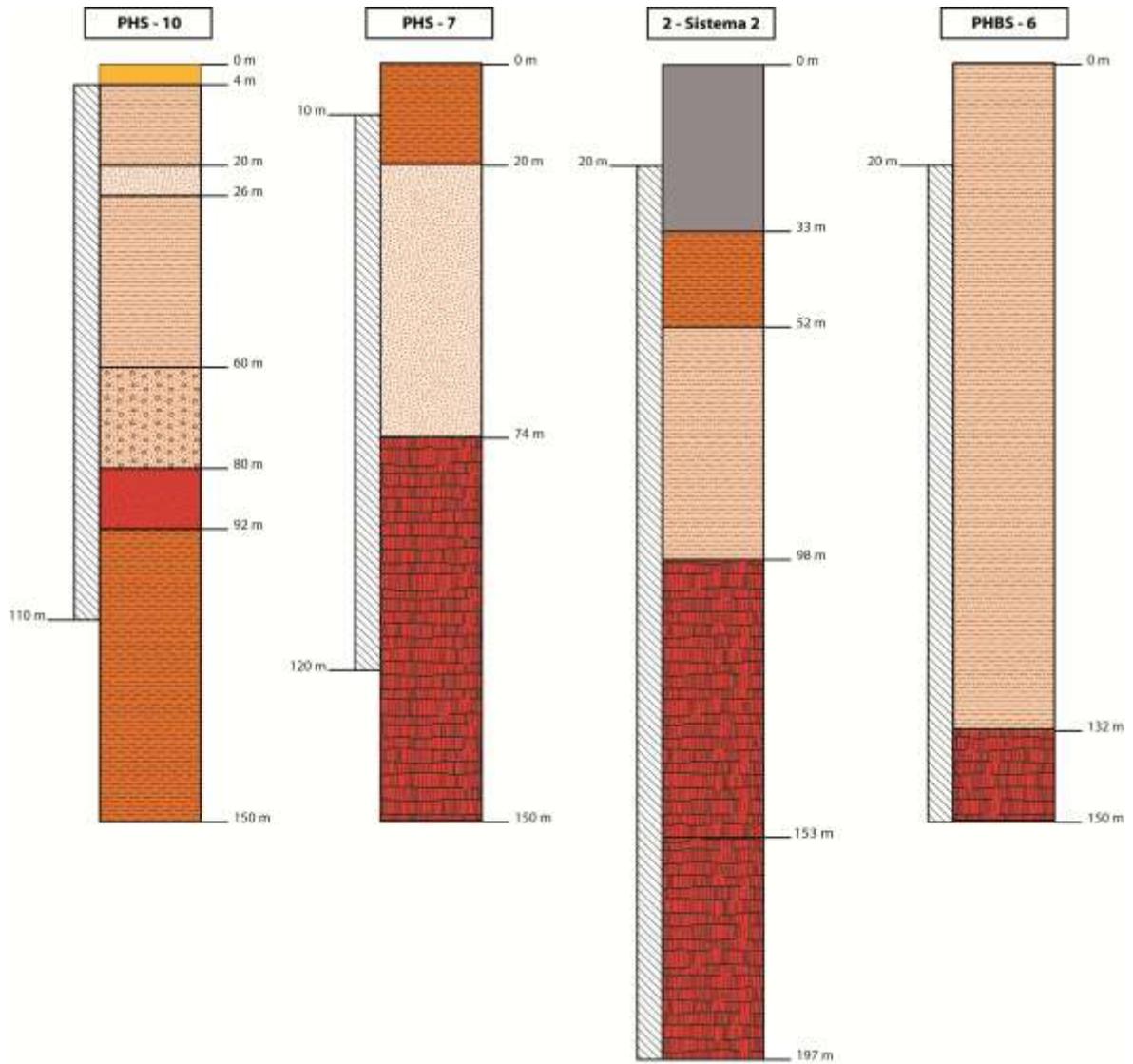


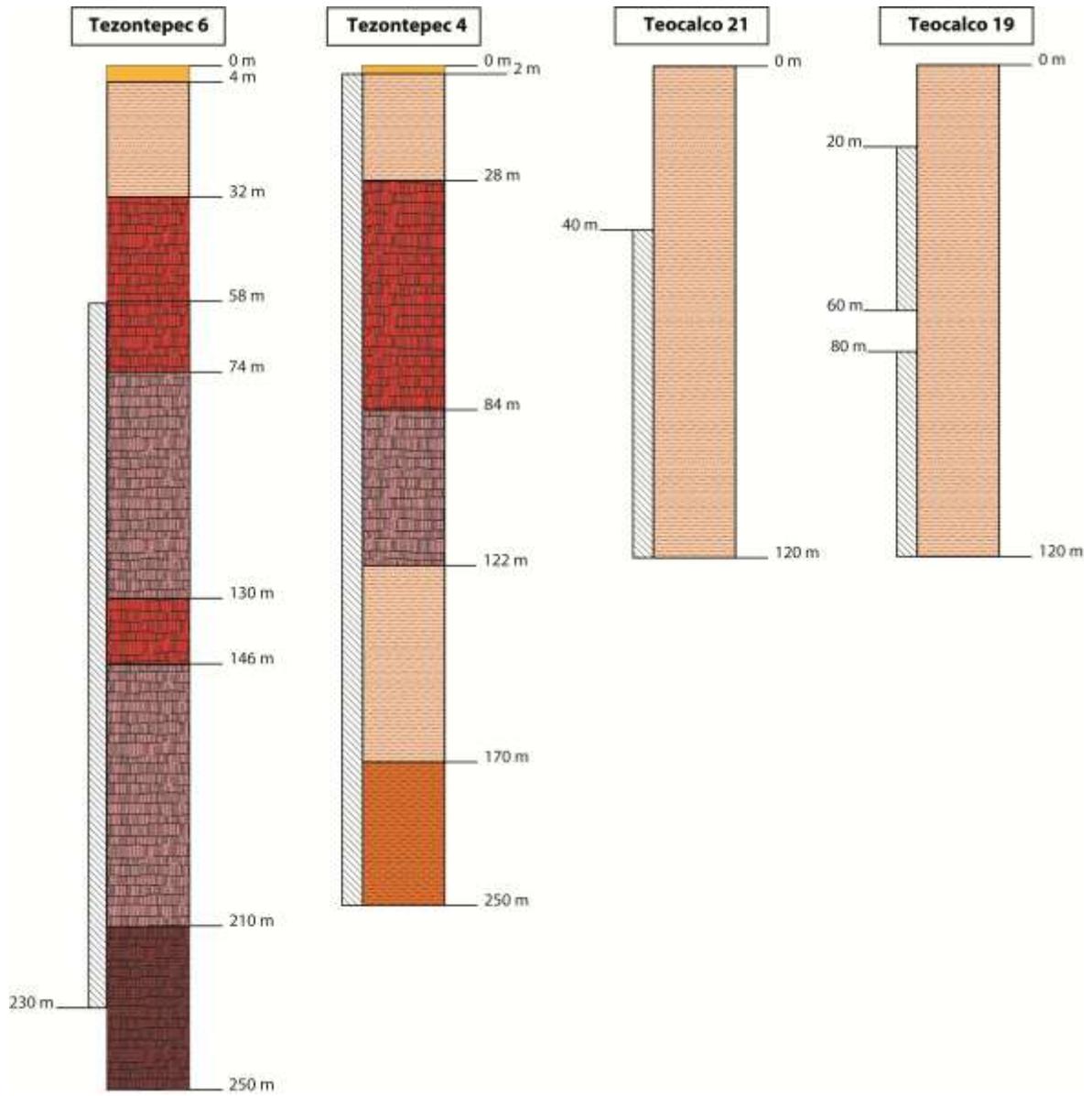
ANEXO DE CORTES LITOLÓGICOS

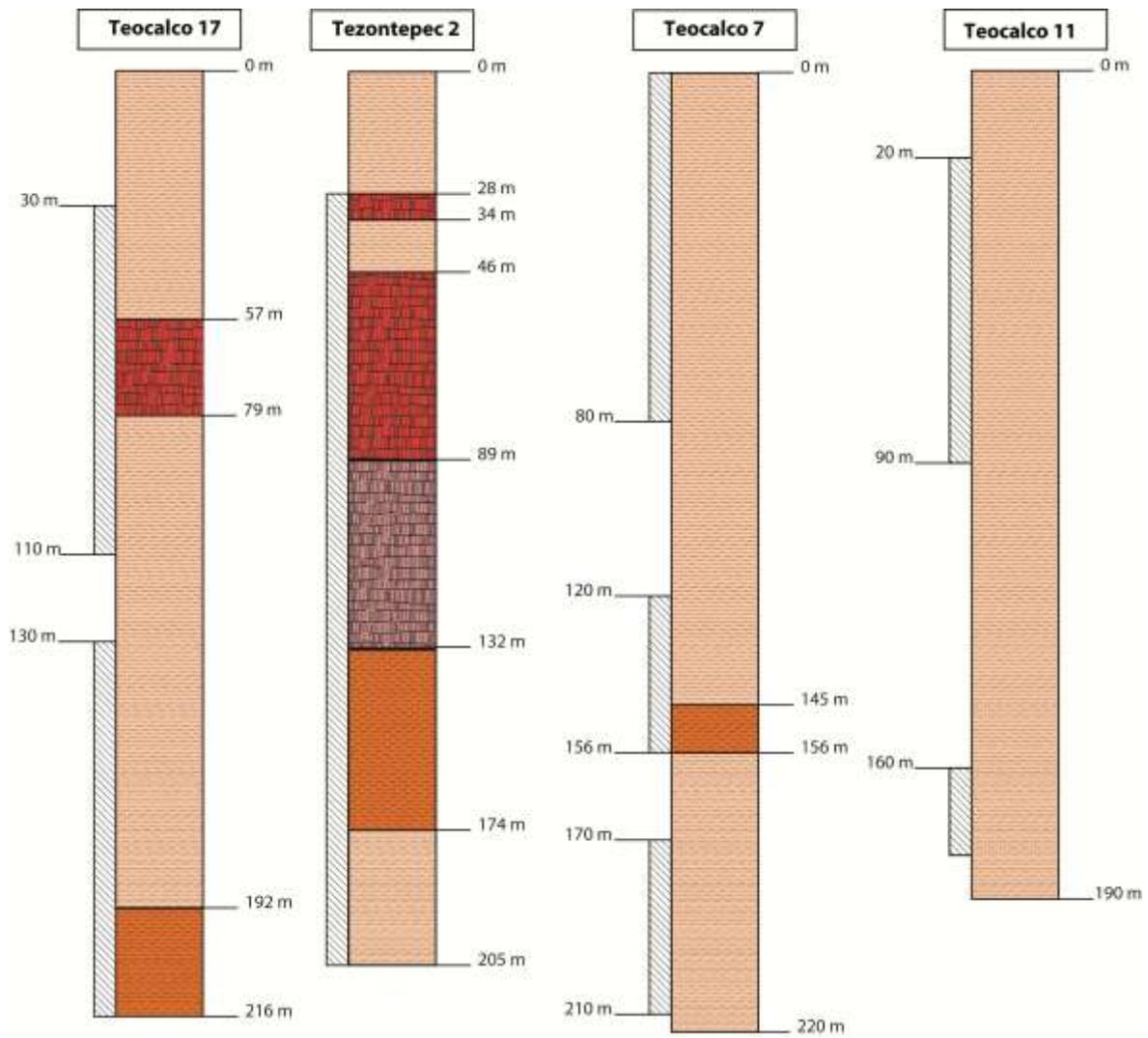


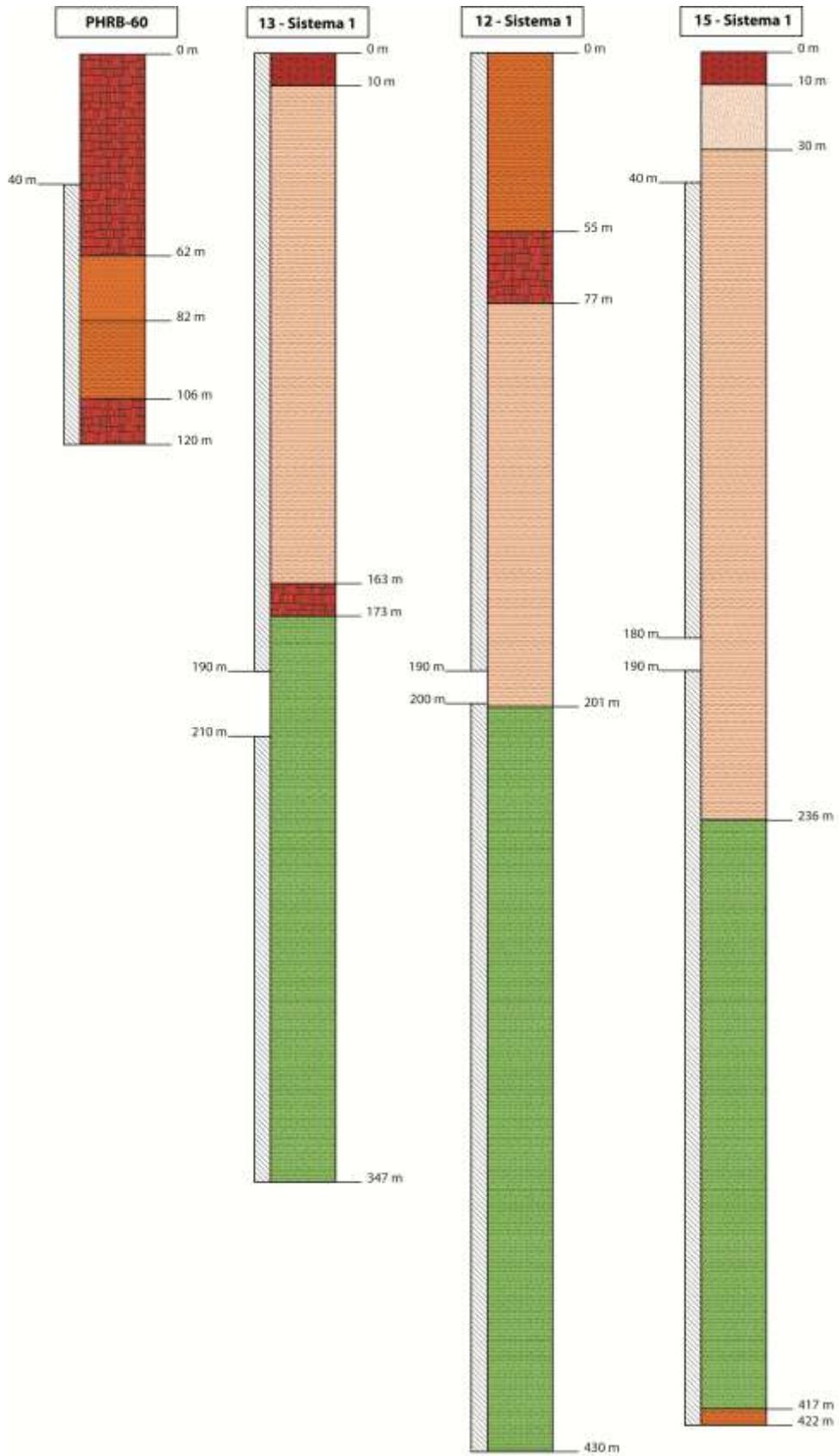


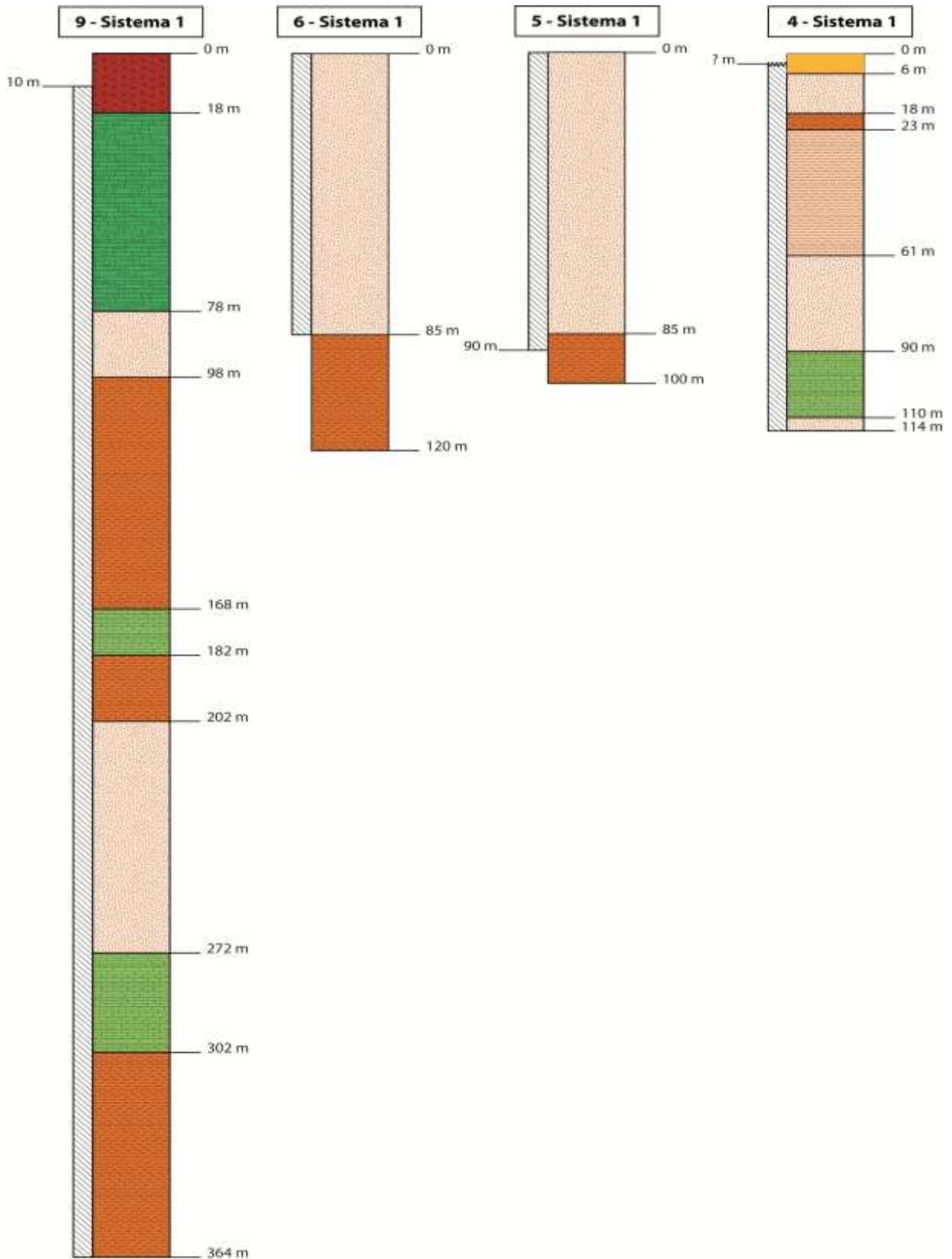


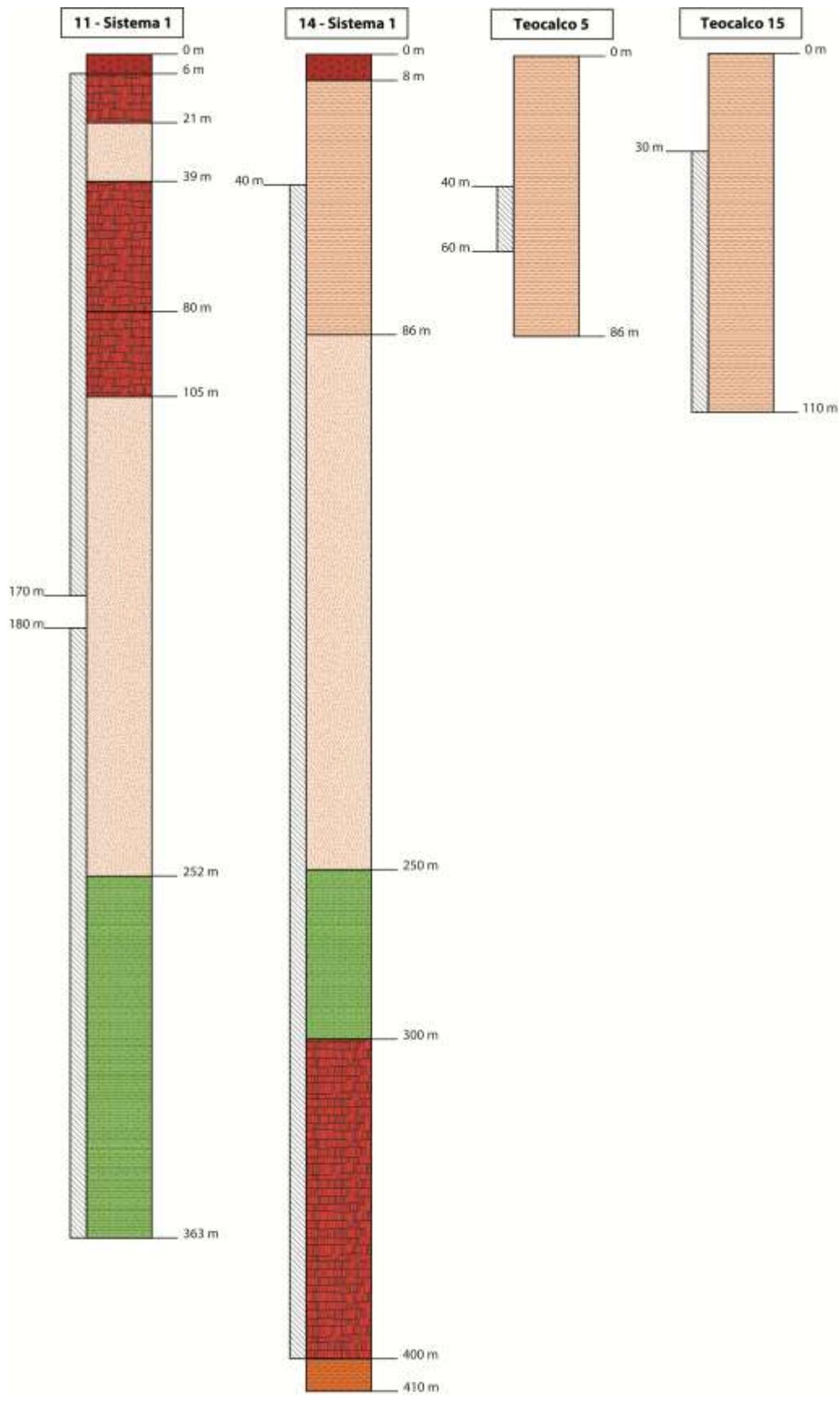


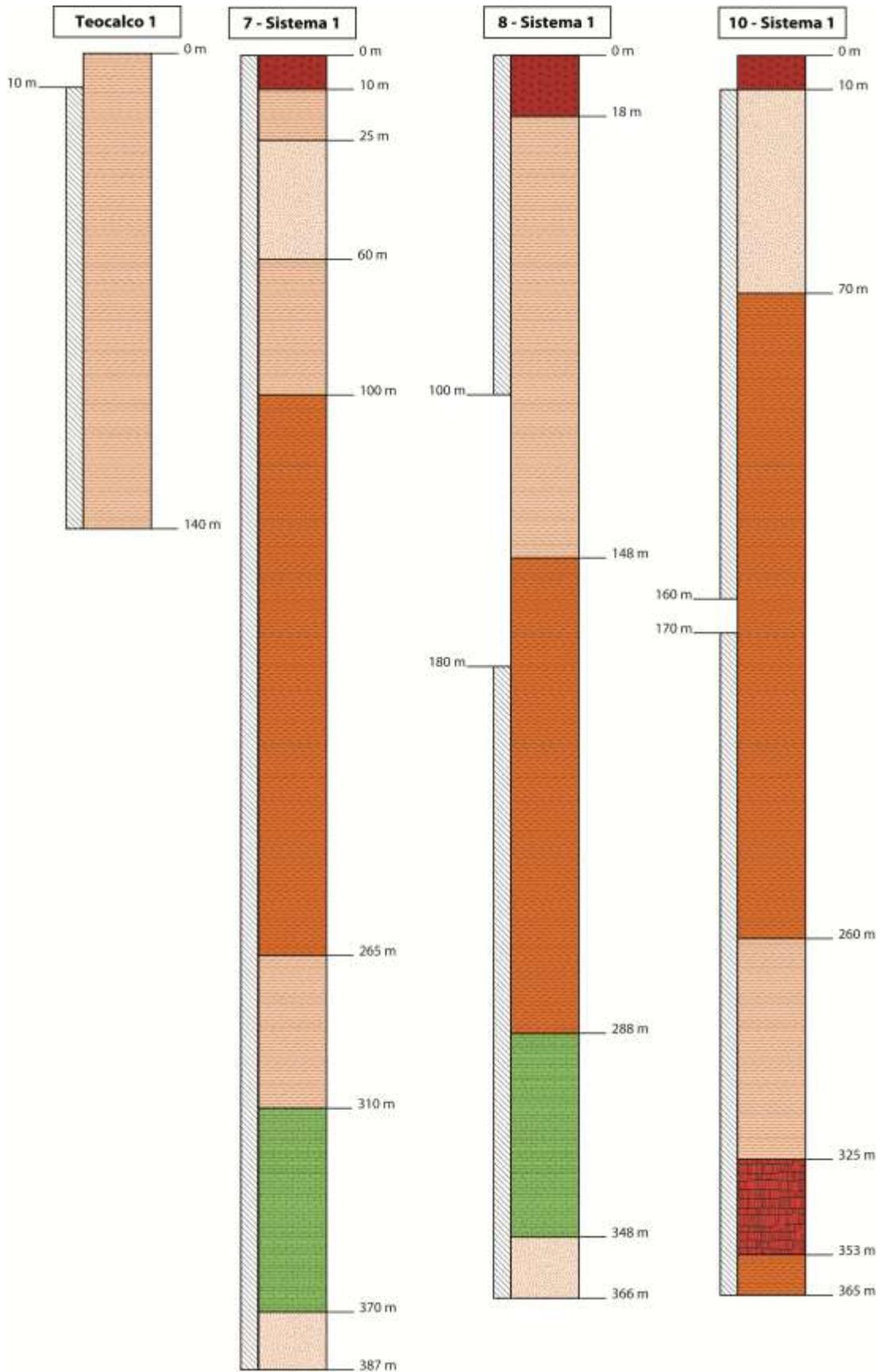


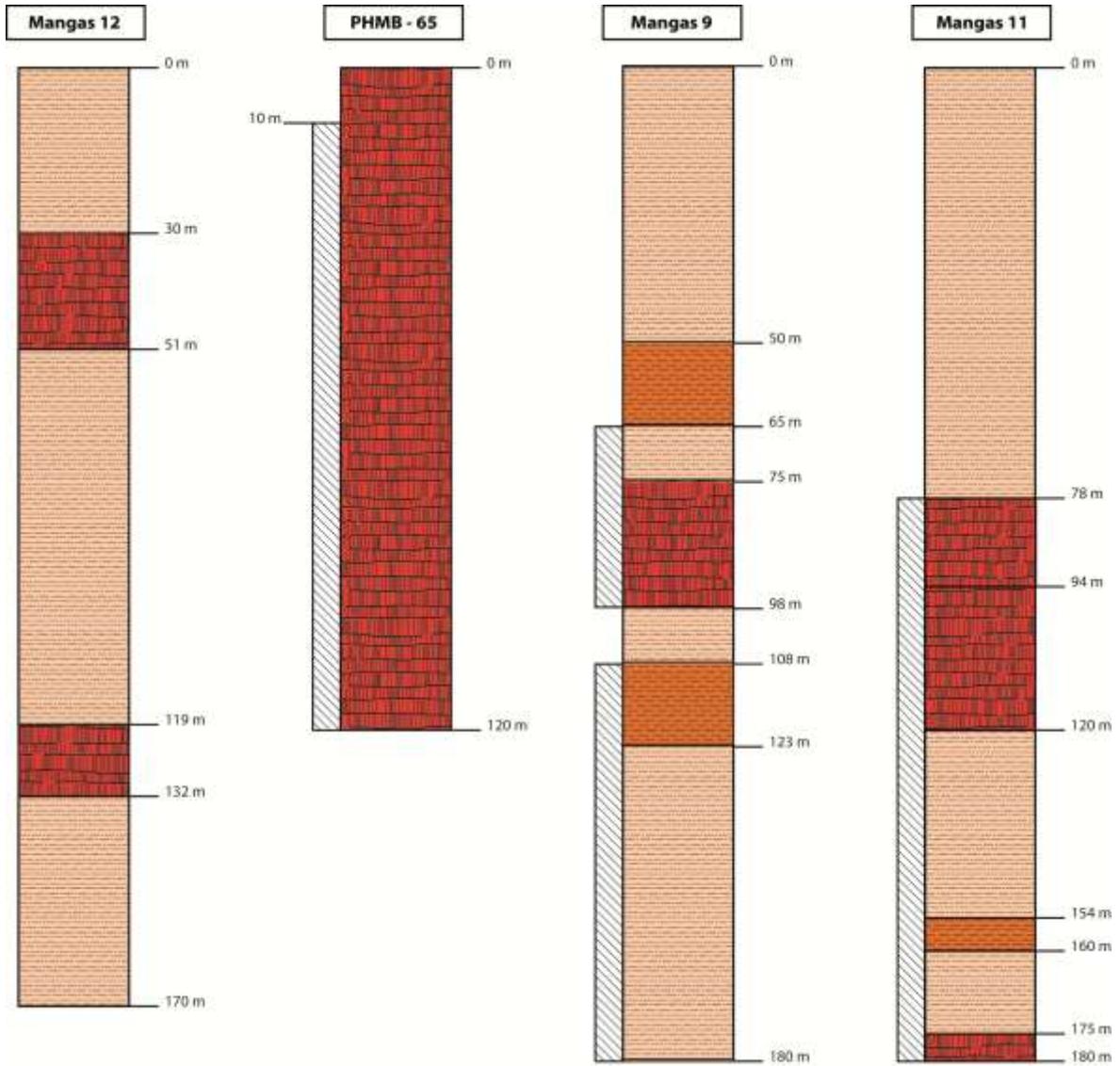


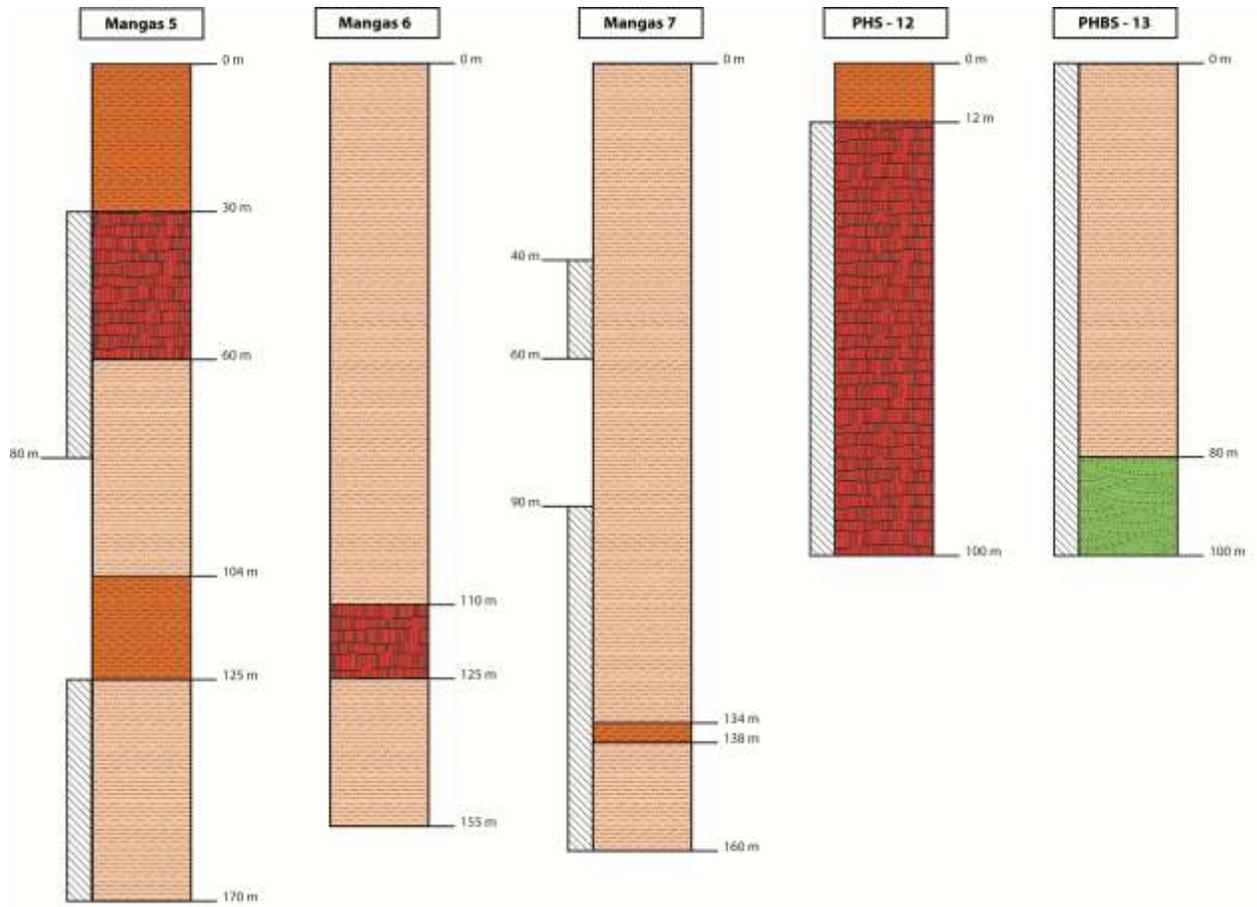


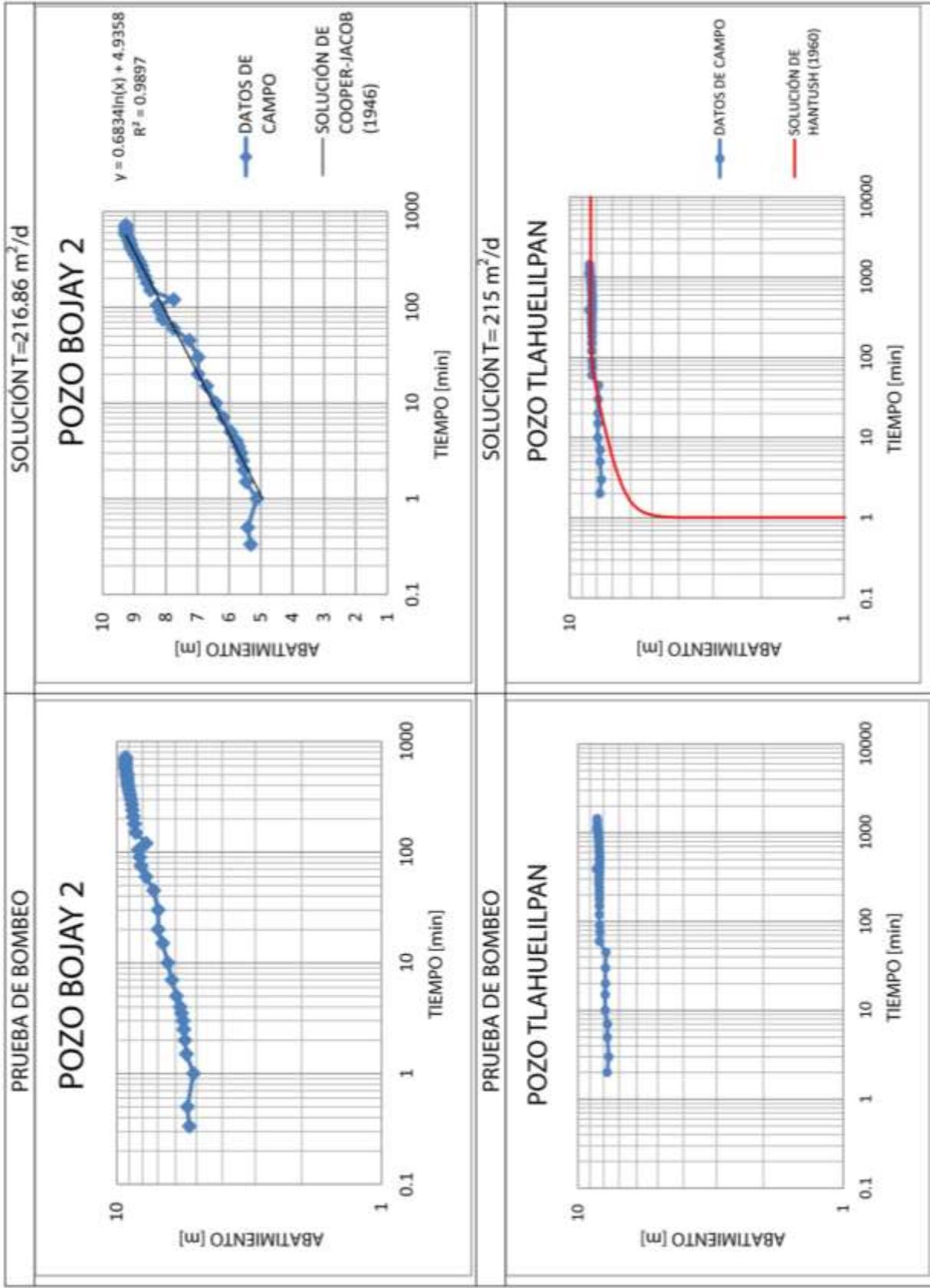


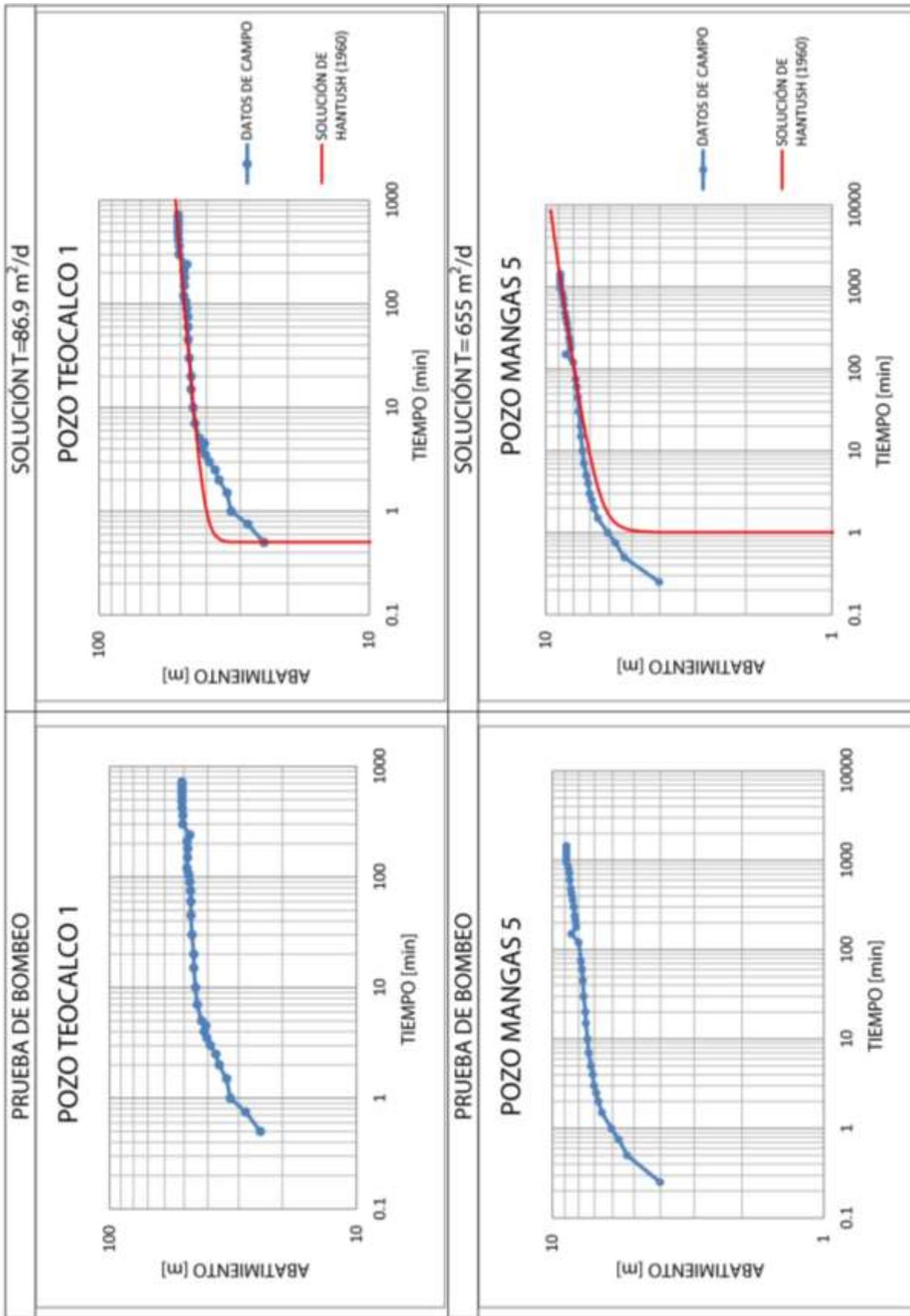


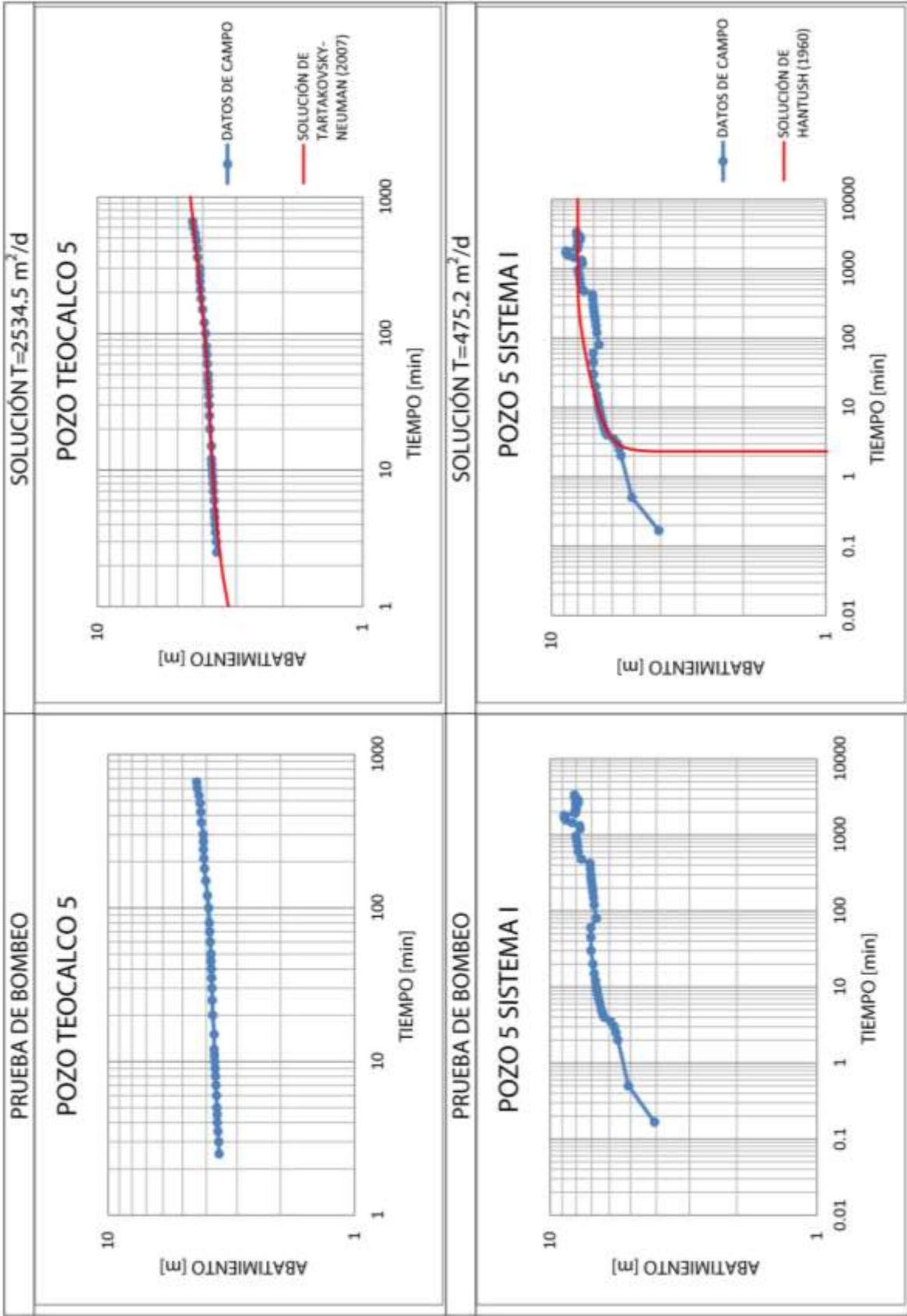






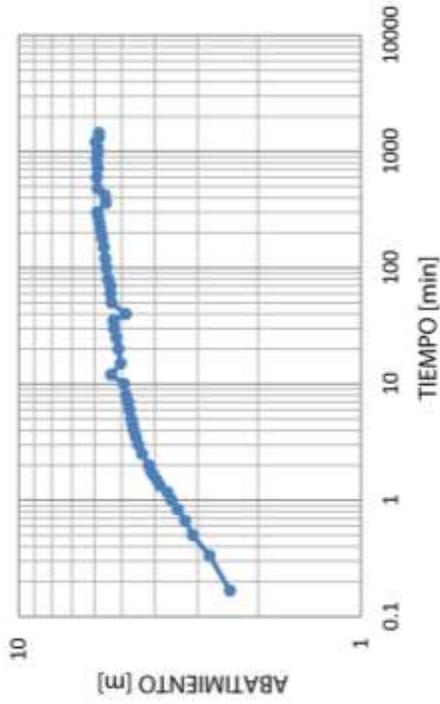






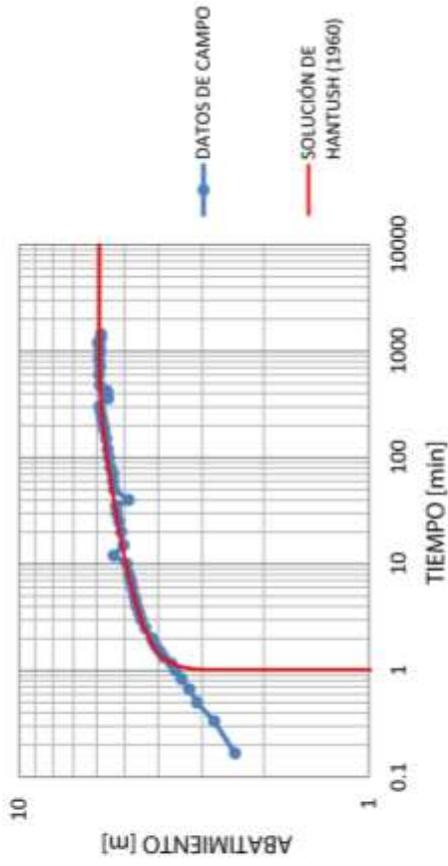
PRUEBA DE BOMBEO

POZO 6 SISTEMA I



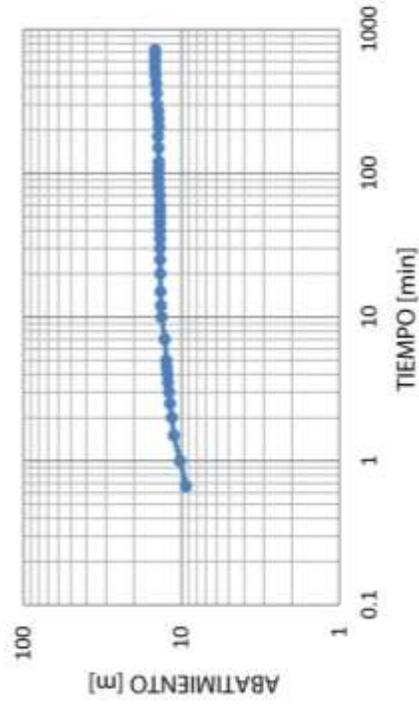
SOLUCIÓN $T=815.5 \text{ m}^2/\text{d}$

POZO 6 SISTEMA I



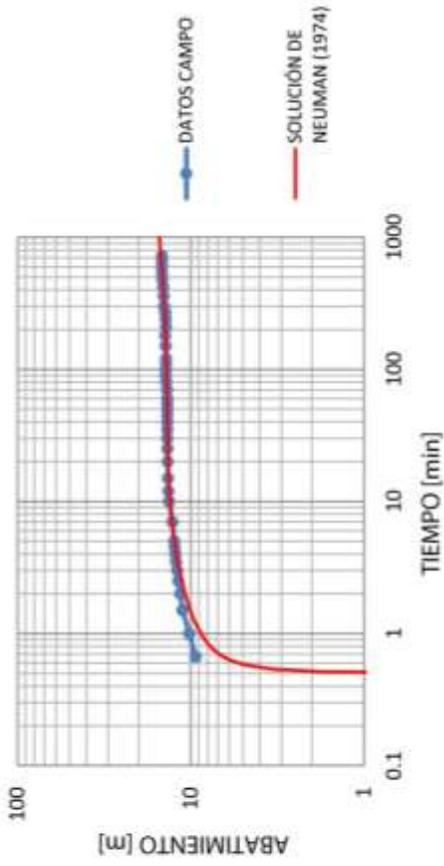
PRUEBA DE BOMBEO

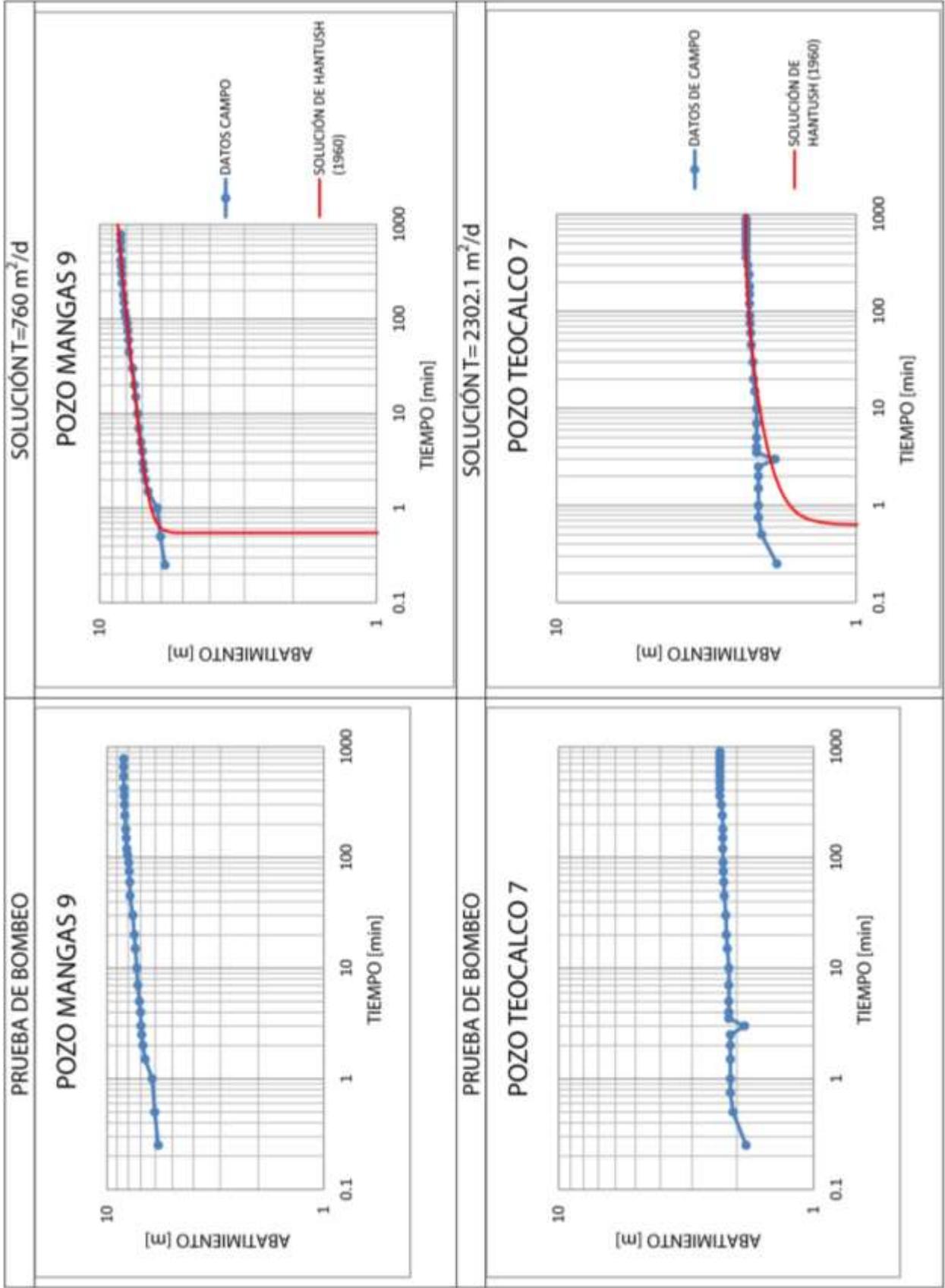
POZO MANGAS 7

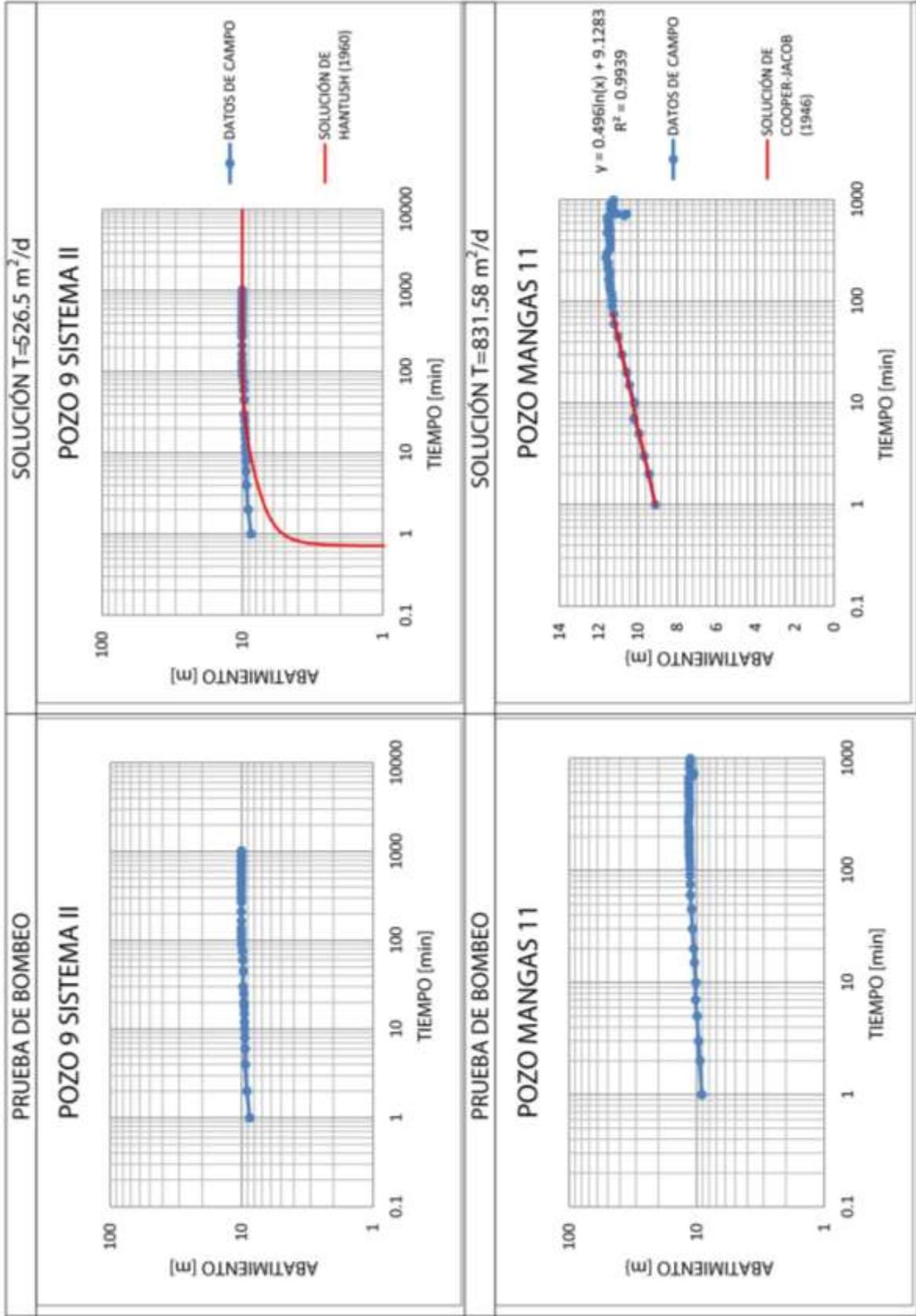


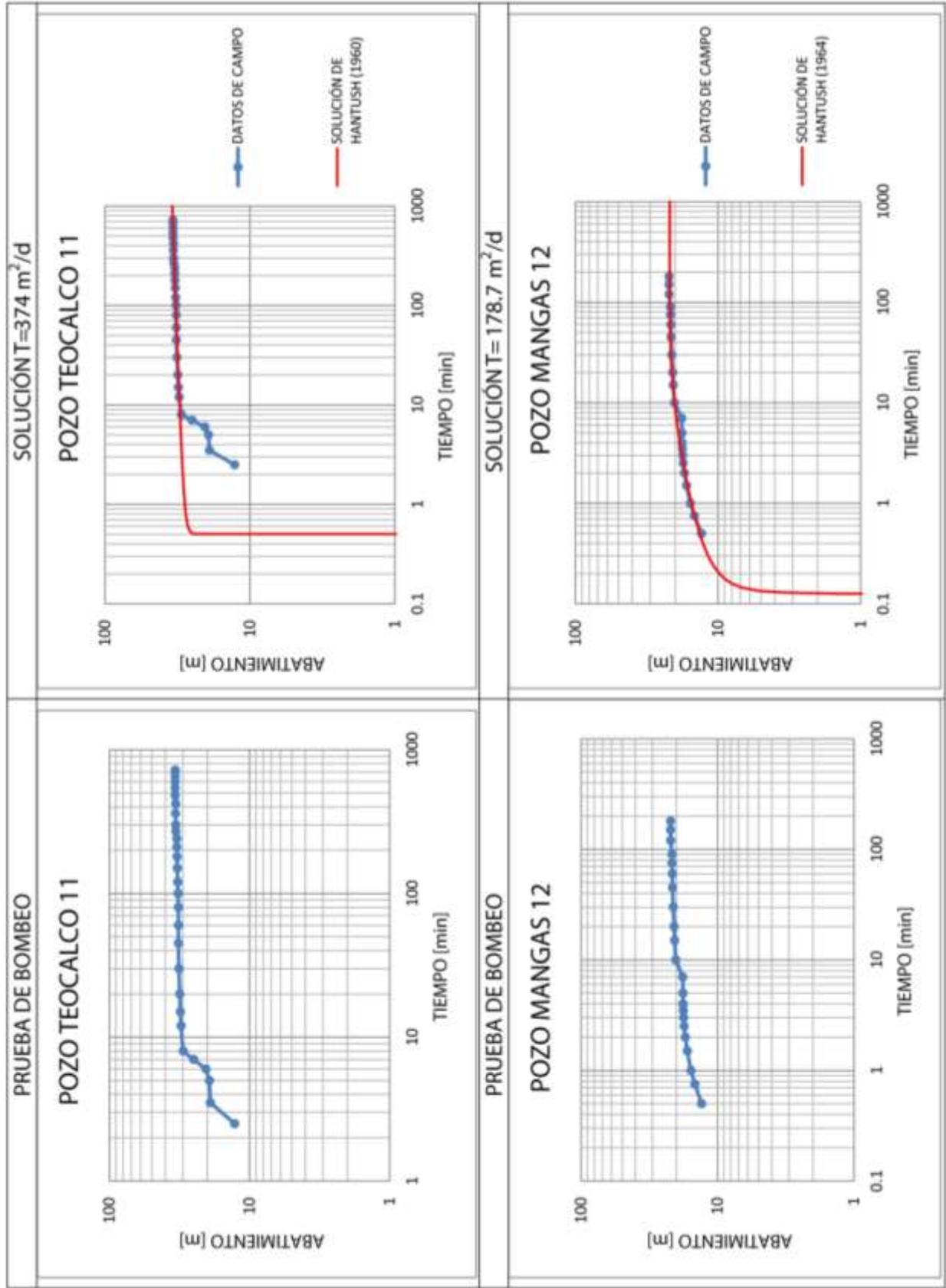
SOLUCIÓN $T=344 \text{ m}^2/\text{d}$

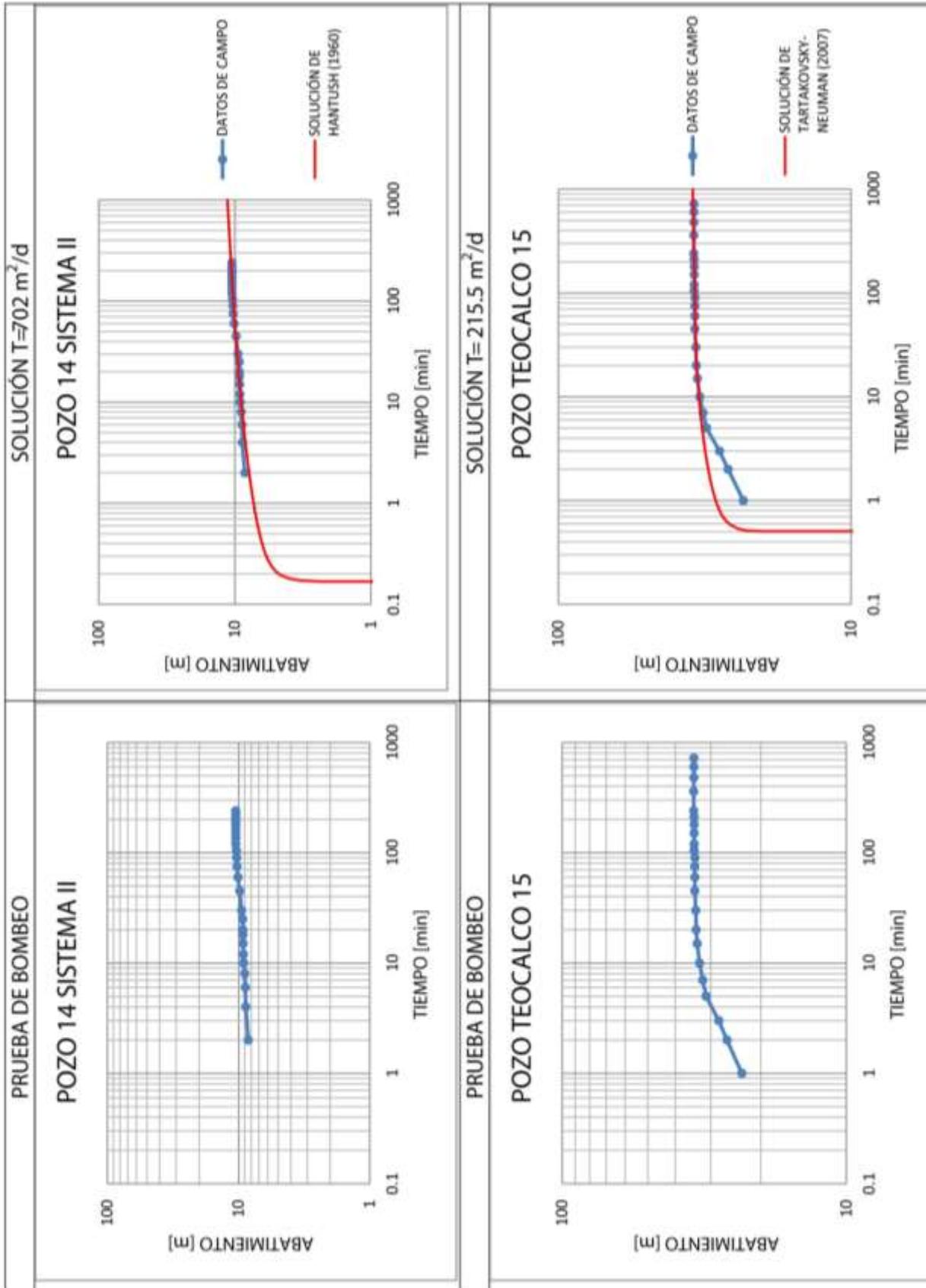
POZO MANGAS 7

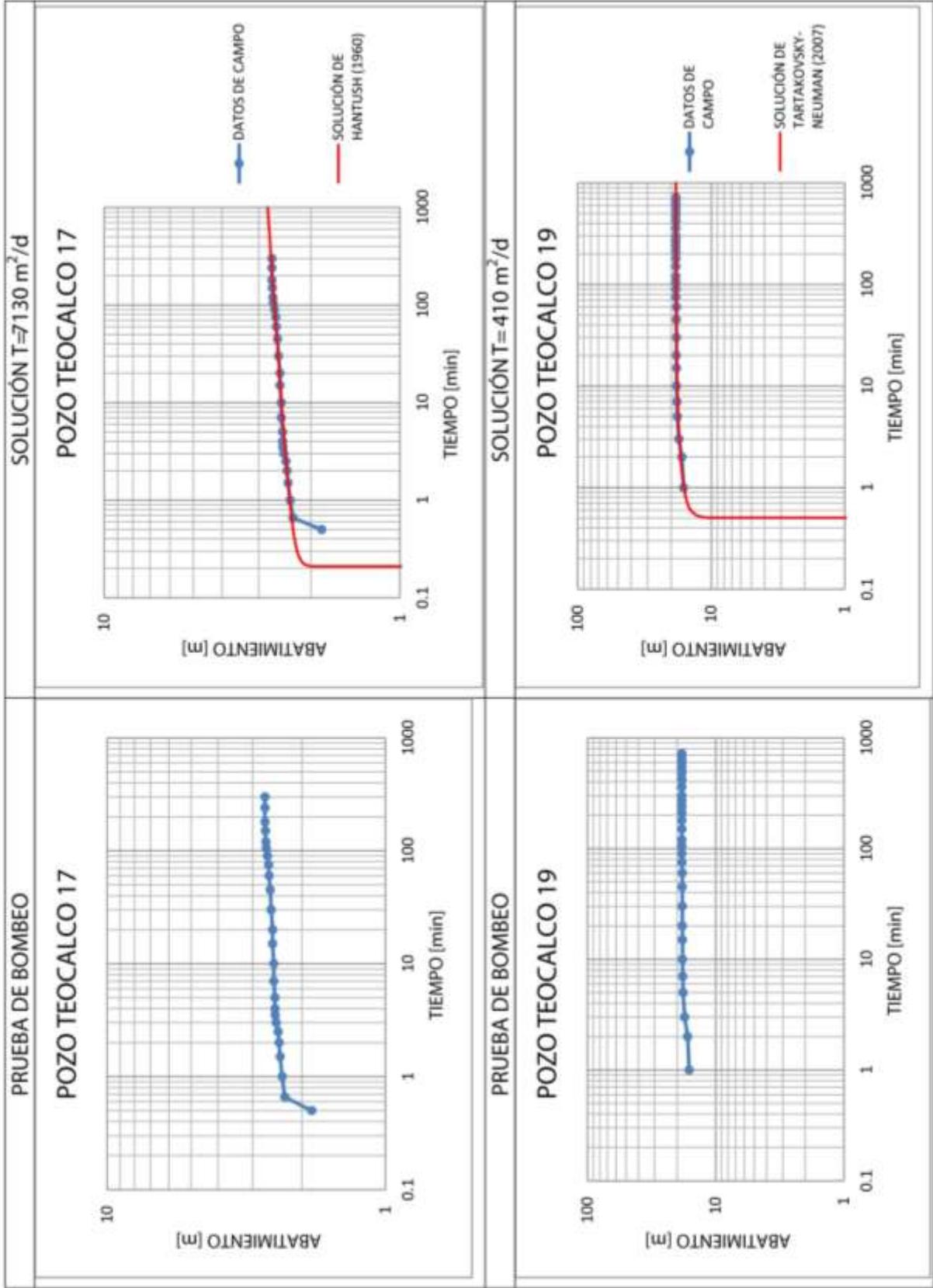


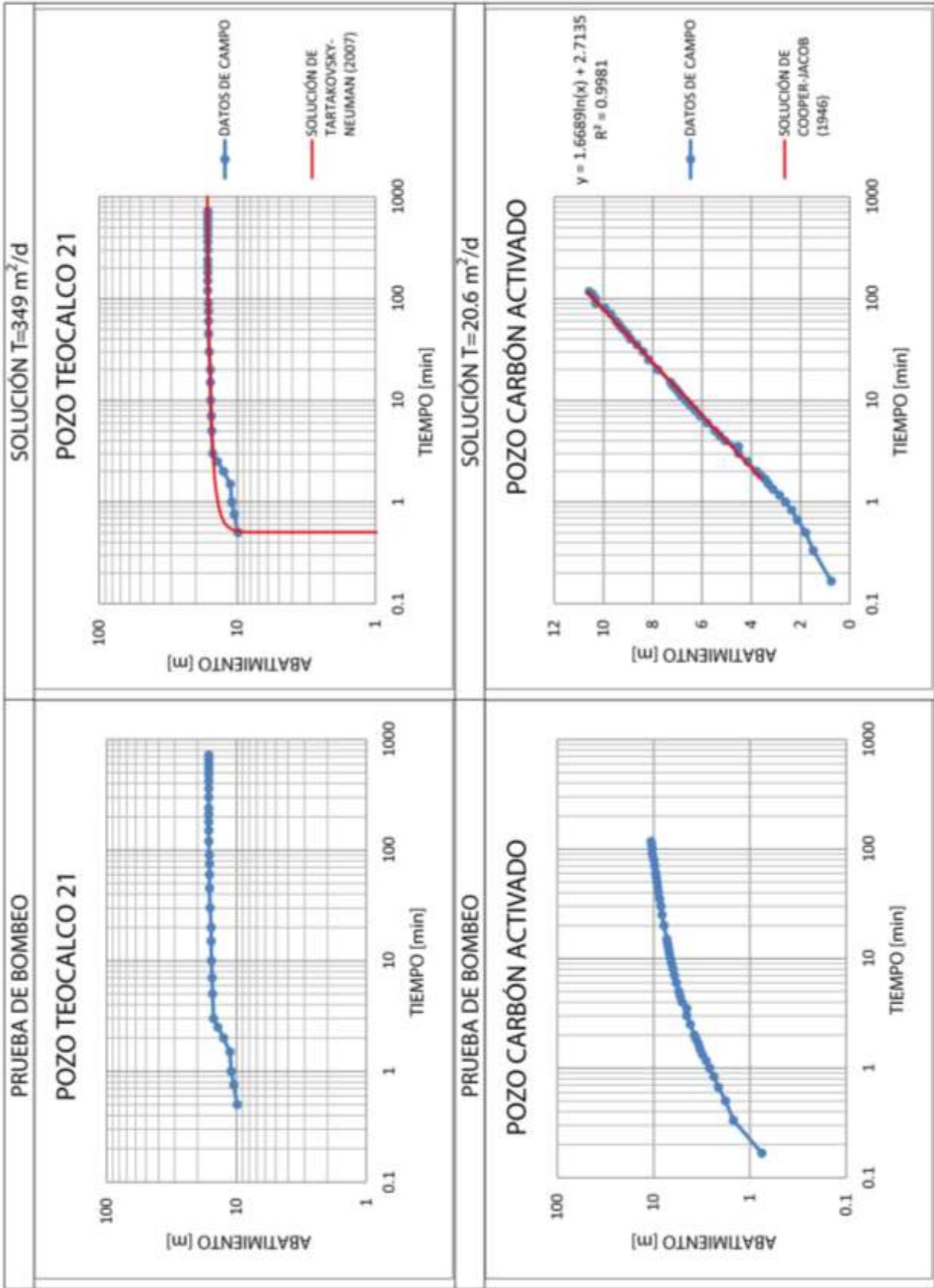


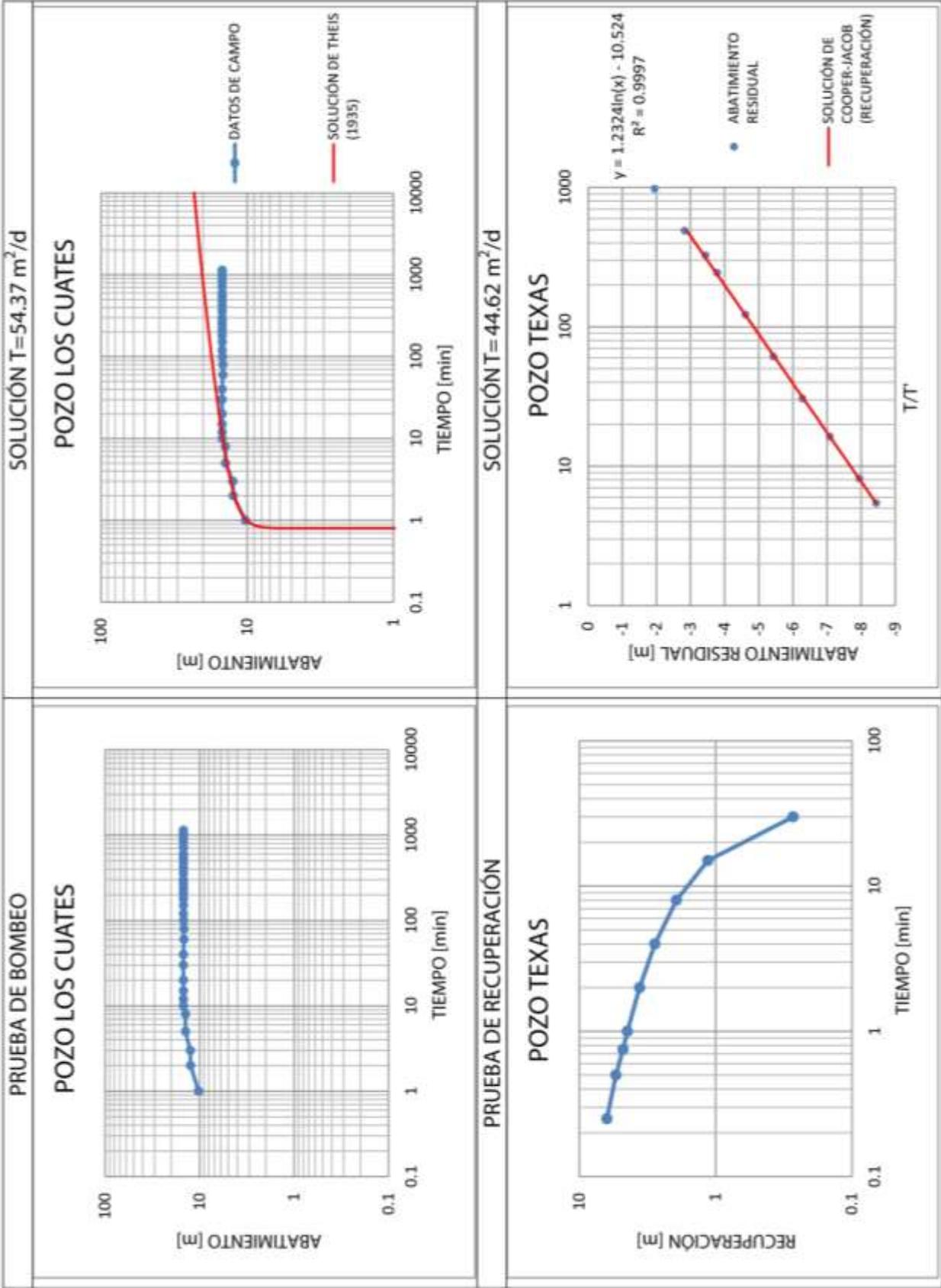


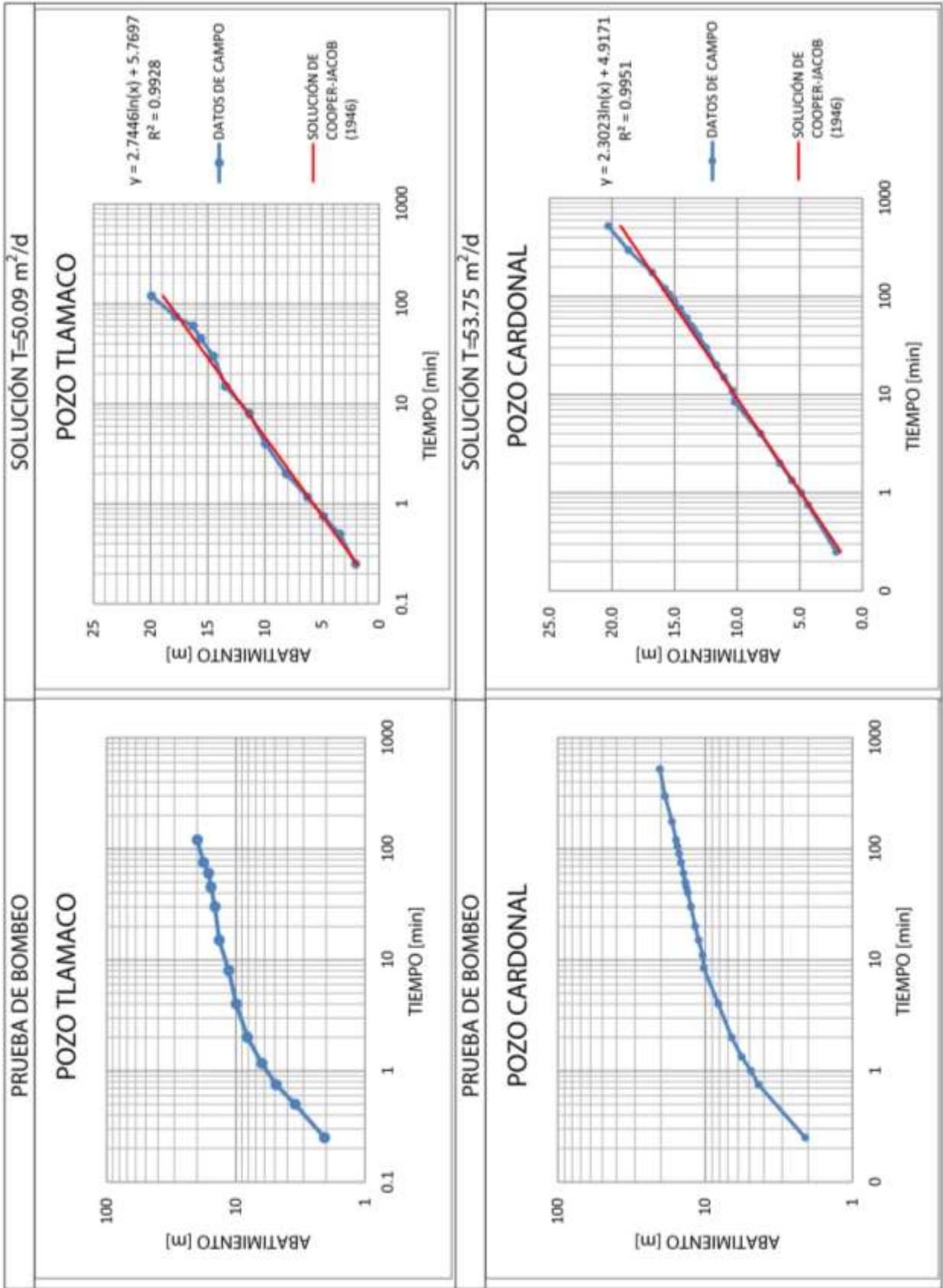


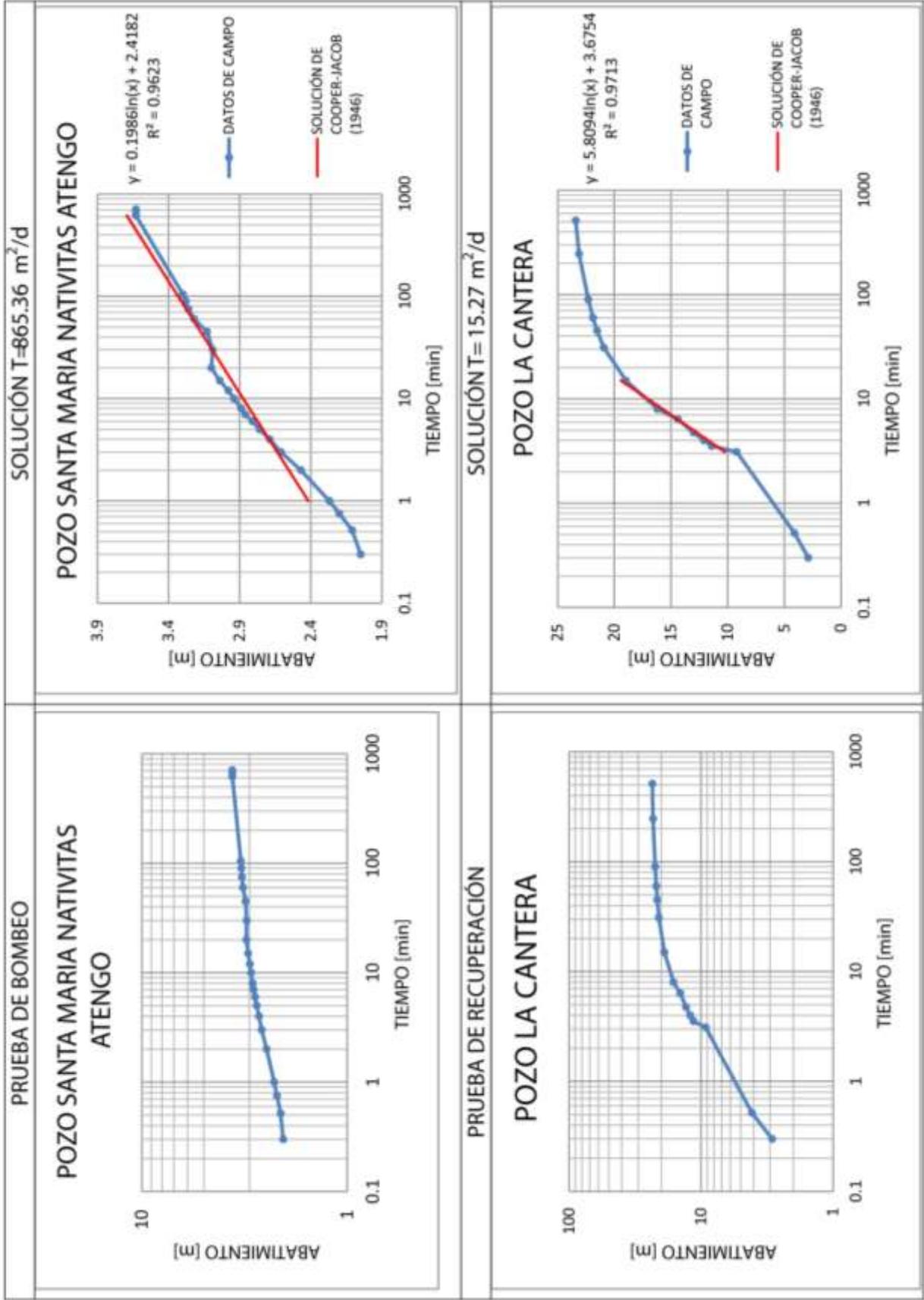






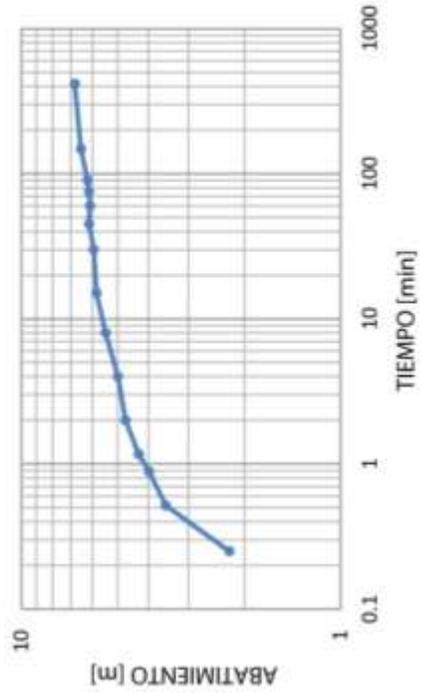






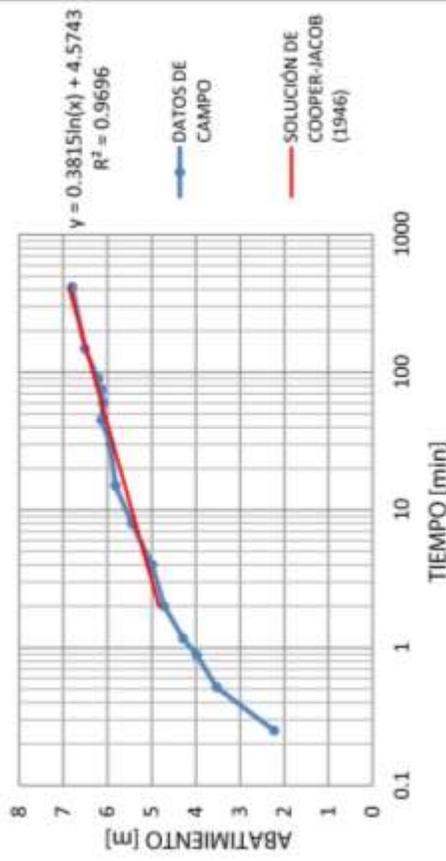
PRUEBA DE BOMBEO

LA RANFLA



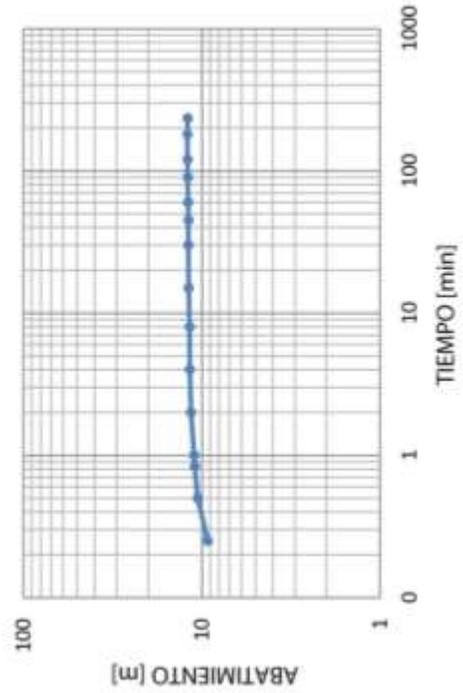
SOLUCIÓN $T=462.56 \text{ m}^2/\text{d}$

LA RANFLA



PRUEBA DE BOMBEO

POZO TEÑÉ



SOLUCIÓN $T=4456.61 \text{ m}^2/\text{d}$

POZO TEÑÉ

