

# BALANCE Y MODELO DEL ACUÍFERO DE TULANCINGO, HGO.

Por: Ing. Juan Manuel Lesser I.  
Ing. Santiago Arellano Islas  
Ing. David González Posadas  
Dr. Luis Ernesto Lesser C.

## RESUMEN EJECUTIVO

Se actualizó el conocimiento sobre el funcionamiento del acuífero del Valle de Tulancingo y a partir de ello se definió su comportamiento a futuro, con el fin de programar las acciones más adecuadas para un manejo sustentable del agua subterránea y la preservación del acuífero. Los resultados sobresalientes indican que existen dos horizontes acuíferos, denominados superficial y profundo. Un acuífero superficial, tiene un espesor de entre 20 y 40 metros y esta formado por material volcánico-sedimentario de granulometría variable. La base de este acuífero somero corresponde a una colada de basalto muy compacta que se comporta como impermeable. El acuífero profundo se ubica prácticamente en todo el valle y es el principal horizonte en explotación. Este acuífero profundo, se encuentra alojado en una serie de capas de piroclásticos gruesos, intercalados con tobas y aluviones de diferente granulometría, con un espesor que llega a alcanzar 300 metros. Se recarga a partir de la infiltración del agua de lluvia sobre las sierras que circundan al valle, principalmente en la sierra del sur, a partir de donde el agua circula en dirección norte, para salir del valle en la zona de barrancas del norte (Metztitlán). En su trayectoria, parte del flujo subterráneo es extraído mediante pozos o aflora en forma de manantiales, para ser utilizada tanto como potable como para riego. Parte del agua utilizada en riego se vuelve a incorporar al acuífero por infiltración en las áreas de cultivo agrícola.

Se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero en el cual las entradas de agua subterráneas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento. Las entradas corresponden al flujo subterráneo con  $54.80 \text{ hm}^3/\text{año}$  y la infiltración a  $19.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ , mientras que las salidas por pozos y manantiales es de  $80.60 \text{ hm}^3/\text{año}$  y las salidas subterráneas asciende a  $4.40 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo cual provoca un cambio de almacenamiento es de  $-10.50 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Se construyó el modelo matemático de flujo utilizado el programa Visual Modflow Premium 2006. Se utilizaron fronteras de carga lejana (GHB) alrededor del valle, las cuales reflejan la entrada por flujo subterráneo. La recarga vertical deducida a través del balance fue distribuida en el valle. Se alcanzó un error RMS de 4.1%. La simulación a 10 años indicó que existirán abatimientos del orden de 3 metros en los alrededores de Tulancingo y entre 10 y 14m al norte del valle.

## INTRODUCCIÓN

Los objetivos del presente trabajo son:

- Actualizar el conocimiento hidrogeológico del acuífero del Municipio y Valle de Tulancingo, Estado de Hidalgo.
- Elaborar un balance de agua subterránea del acuífero y determinar la disponibilidad del mismo.
- Desarrollar un modelo matemático que permita la simulación hidrodinámica del acuífero para determinar su futuro y programar diferentes escenarios de manejo del agua subterránea.

La zona de estudio se localiza en la porción oriental del Estado de Hidalgo, entre los paralelos  $19^{\circ} 56'$  y  $20^{\circ} 17'$  de latitud norte y los meridianos  $98^{\circ} 12'$  y  $98^{\circ} 32'$  de longitud oeste. En la figura 1 se muestra la localización regional y local de la zona estudiada. Geohidrologicamente la zona de estudio se encuentra dentro del acuífero Clave 1317-Valle de Tulancingo, cuyos límites fueron publicados por la Comisión Nacional del Agua en el Diario Oficial de la Federación en el año del 2003).

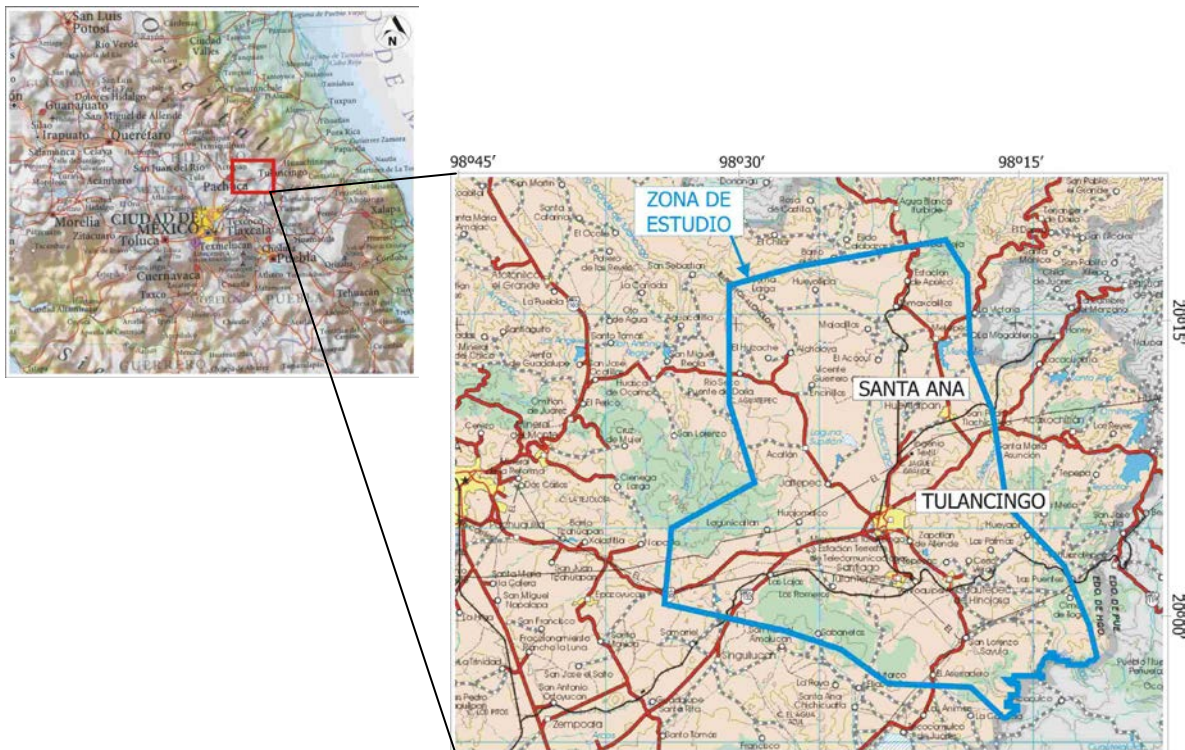


Figura 1. Localización de la zona de estudio

## GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Existen varios tipos de relieve de la superficie del terreno, entre los que destacan: Sierras volcánicas, conos volcánicos menores, mesetas y valles (Figura 2).

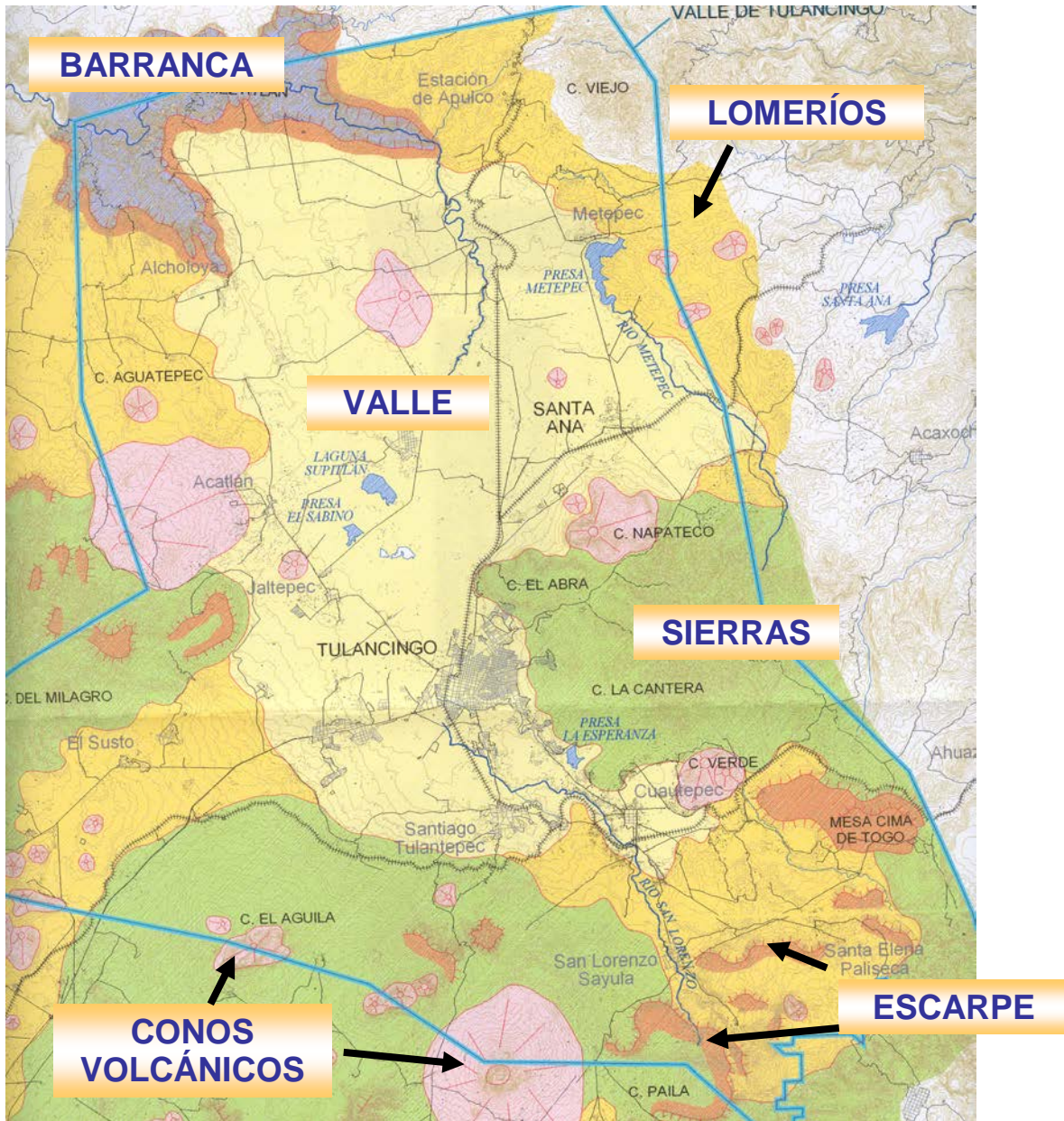


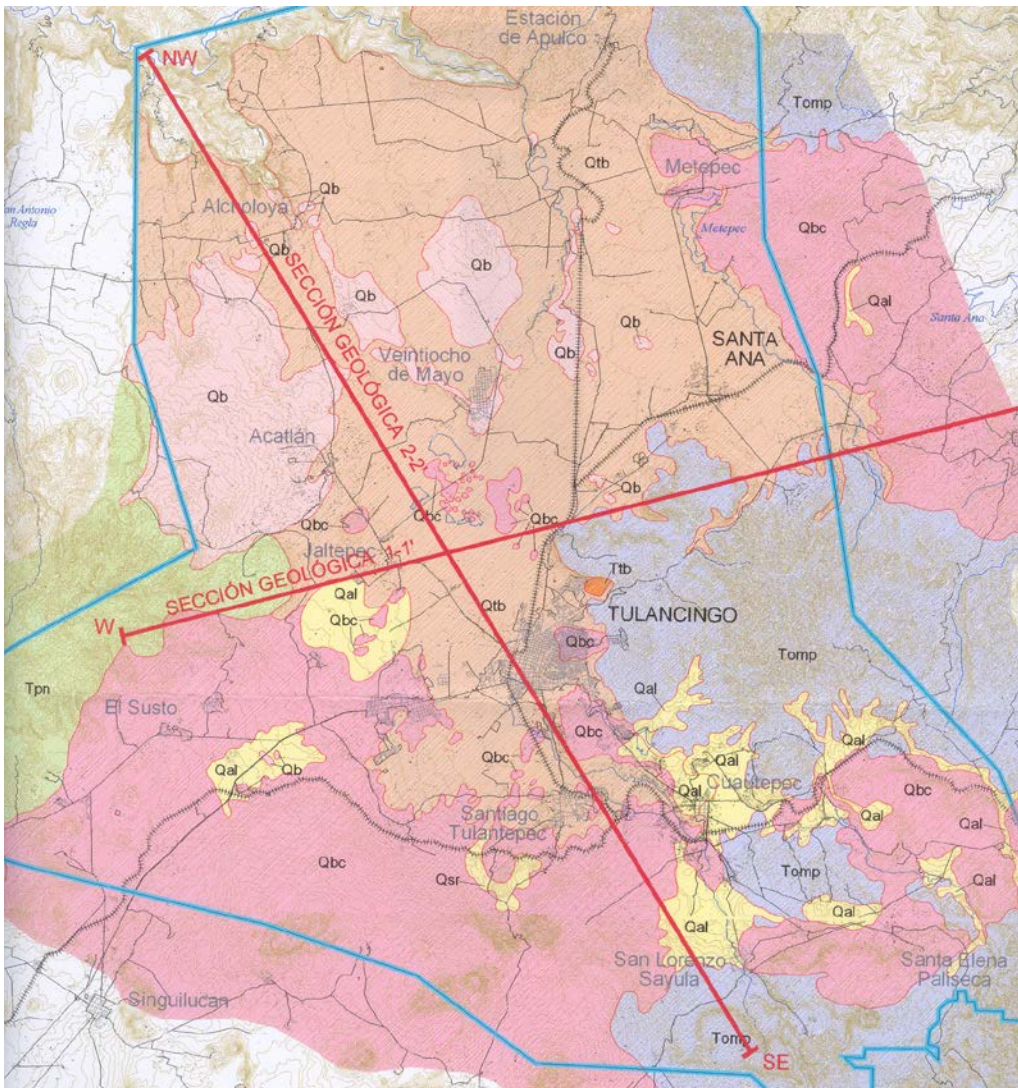
Figura 2. Geomorfología

Dentro de la zona de trabajo se encuentran principalmente rocas volcánicas constituyendo las principales elevaciones así como el basamento y parte del valle, los cuales son de edad Terciario y

Cuaternario. Rellenando el valle y en parte interdigitado con materiales volcánicos, se encuentran sedimentos aluviales de edad Cuaternaria.

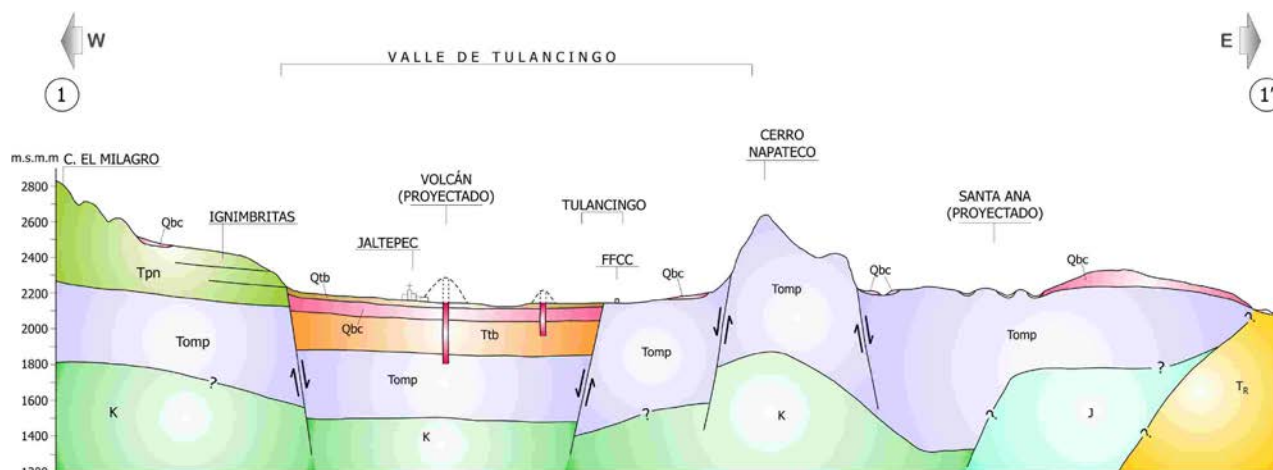
Las rocas más antiguas corresponden al Grupo Pachuca y a la Formación Riolita Navajas que constituyen las sierras del oriente y poniente respectivamente. En el valle se encuentra una capa de clásticos con capas lenticulares de basaltos de la Formación Atotonilco, correspondientes las tres unidades del Terciario.

Los materiales volcánicos del Cuaternario se identificaron como basalto y material cinerítico (Qbc), derrames basálticos (Qb) que forman la sierra del sur noreste y, basaltos y materiales cineríticos (Qbc) que afloran en la porción norte y noroeste, correspondiendo todos ellos al Cuaternario. Por lo que respecta a los materiales sedimentarios aluviales, estos incluyen a las unidades de clásticos arcillosos, arenosos y conglomeráticos (Qtb) y a los aluviones (Qal), ambos del Cuaternario y que se encuentran rellenando el Valle de Tulancingo (figura 3a).



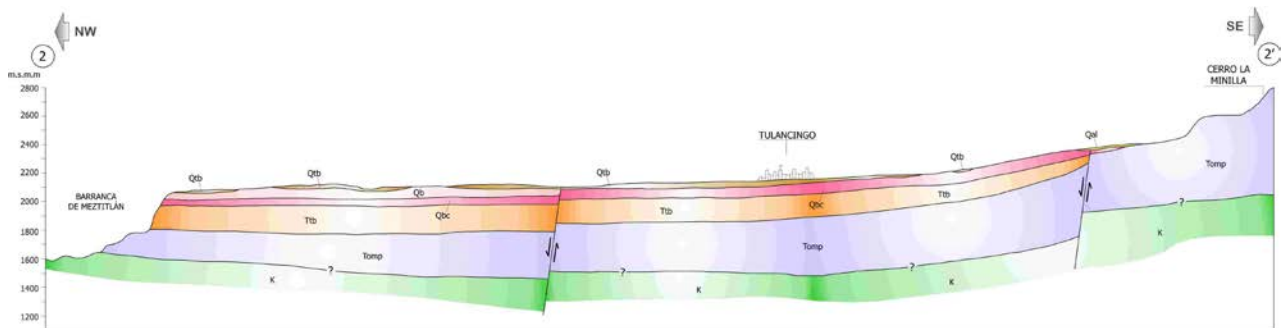
**Figura 3a.** Geología y localización de secciones geológicas

Con el objeto de ilustrar el tipo y disposición de las rocas y materiales que constituyen el subsuelo, se formaron secciones geológicas (figura 3). Para su construcción se tomó en cuenta la geología superficial y la geofísica realizada en el mismo estudio. No se tuvo acceso a cortes litológicos. La sección 1-1' (figura 3b) tiene orientación W-E y se trazó desde el Cerro de El Milagro hasta el noreste de Tulancingo. Al oeste sobresale el Cerro de El Milagro constituido por lavas riolíticas (ignimbritas) de la Formación Riolita Navajas, la cual sobreyace a volcánicos del Grupo Pachuca. En la sierra al noreste de Tulancingo, sobresale el Cerro Napateco, constituido por volcánicos del Grupo Pachuca. En el Valle de Tulancingo se encuentra un reducido espesor de aluviones que cubren a una colada de basaltos de alrededor de 50 metros de espesor. Bajo ella, se encuentra la Formación Atotonilco con un espesor aproximado de 100 metros. Bajo los materiales anteriores y constituyendo el basamento de la región, se encuentran las rocas calcáreas del Cretácico, Jurásico y Triásico, estas últimas afloran en el extremo oriental de la sección.



**Figura 3b.** Sección geológica 1-1'

La sección geológica 2-2' (figura 3c) tiene una orientación NW-SE y se extiende desde la barranca de Metztlán al NW, hasta las elevaciones topográficas del sur del valle. Se observa la secuencia geológica en capas horizontales y solamente afectadas en la porción central por una falla normal. Materiales clásticos arcillo-arenosos y conglomeráticos cubren a derrames basálticos y piroclásticos. Dichos materiales descansan sobre la Formación Atotonilco y el Grupo Pachuca. Se infirió que la secuencia terciaria, cubre a las rocas del Cretácico.



**Figura 3c.** Sección geológica 2-2'

Las rocas existentes en el Valle de Tulancingo se clasificaron de acuerdo a su capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de agua en el subsuelo, en: Rocas permeables y rocas impermeables.

Las rocas permeables corresponden a los materiales aluviales y clásticos arcillosos-arenosos y conglomeráticos que constituyen el Valle de Tulancingo, con un espesor de cuando menos 200 metros, donde se permite la acumulación de agua en el subsuelo que da lugar al principal acuífero de la región. Estos materiales presentan intercalaciones de lavas basálticas y entre ambos constituyen a la principal unidad acuífera del Valle de Tulancingo. Otro tipo de materiales permeables corresponden a basaltos y material cinerítico (Qbc y Qb) que forman principalmente las sierras del sur y noreste. Están constituidas por lavas fracturadas y piroclásticos permeables, que permiten la infiltración de agua al subsuelo, por lo que funcionan principalmente como zonas de recarga o alimentación al acuífero del valle. La Formación Atotonilco (Ttb) junto con los clásticos de la Formación Qtb y los aluviones Qal, dan origen al acuífero de la zona en estudio, mientras que los basaltos y piroclásticos de la Formación Qbc que constituyen las partes altas, corresponden a zonas de recarga.

Por otra parte, las rocas impermeables corresponden a la Riolita Navajas y al Grupo Pachuca, las cuales se encuentran constituidas principalmente por materiales de composición riolítica que en general se comportan como impermeables al flujo de agua subterránea y que constituyen las fronteras laterales del acuífero y muy posiblemente también correspondan al basamento.

Las rocas permeables funcionan como zona de recarga o zona acuífera y las impermeables como barrera al flujo subterráneo. Las zonas de recarga se ubican hacia las partes topográficas altas, donde el agua de lluvia se infiltra y circula hacia cotas menores, mientras que en las partes bajas las rocas permeables almacenan agua y funcionan como acuífero. Las principales zona de recarga se ubican en la parte sur, al noreste y al oeste del valle.

## PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO

Para el año 2006, los niveles varían de 50 a 180 metros, encontrándose los más someros en el extremo norte de la zona, al oeste de Metepec y los más profundos en los extremos noroeste y sur. En la Ciudad de Tulancingo y el centro del valle, los valores varían entre 70 y 80 metros de profundidad. Hacia la sierra del sur se profundizan a 120 metros debido a la elevación de la superficie del terreno. Del poblado de Veintiocho de Mayo hacia al norte de Alcholoa, el nivel se va profundizando de 70 hasta 180 metros, debido a la presencia de las barrancas de Meztitlán que drenan al acuífero (Figura 4).

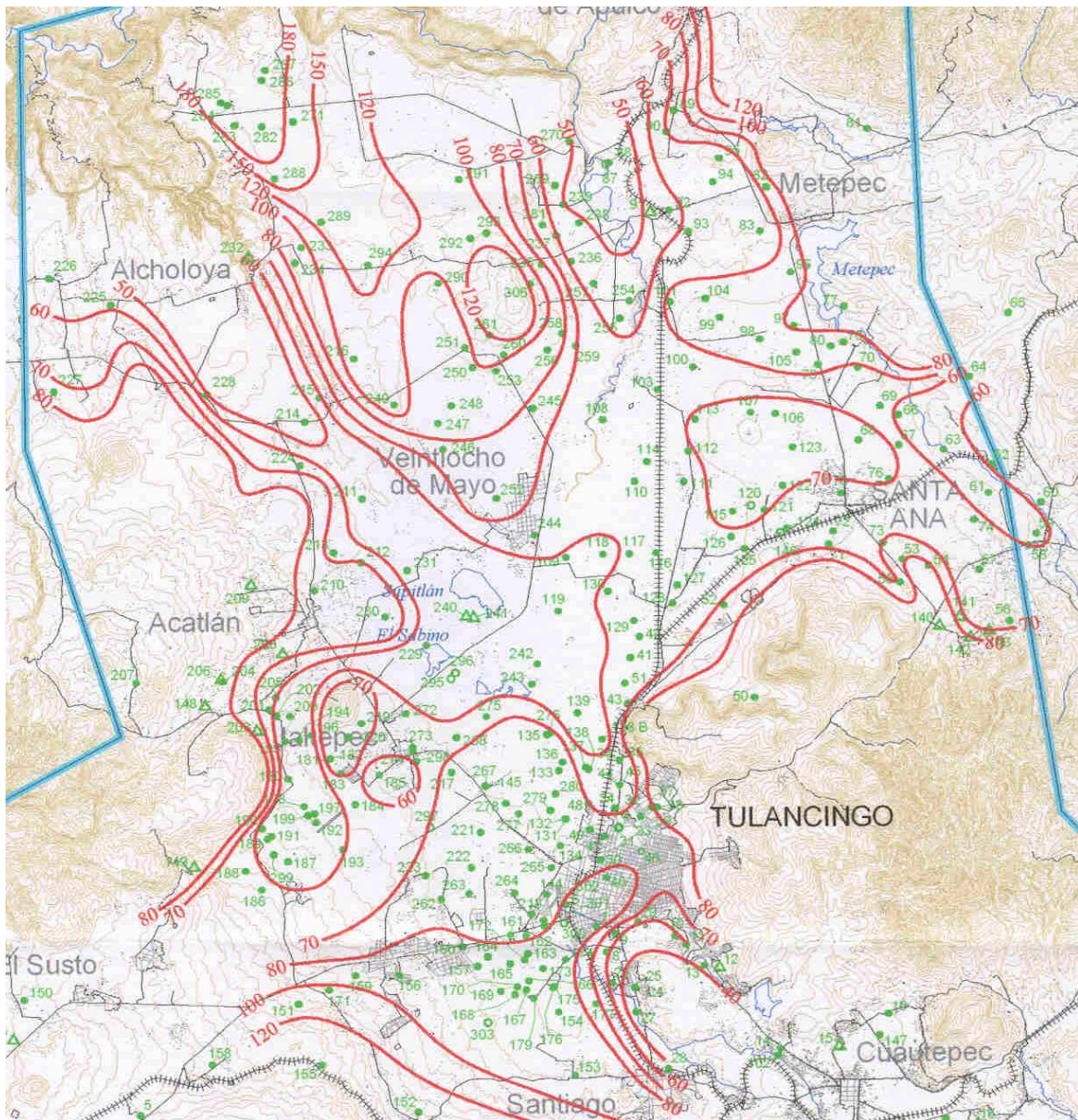
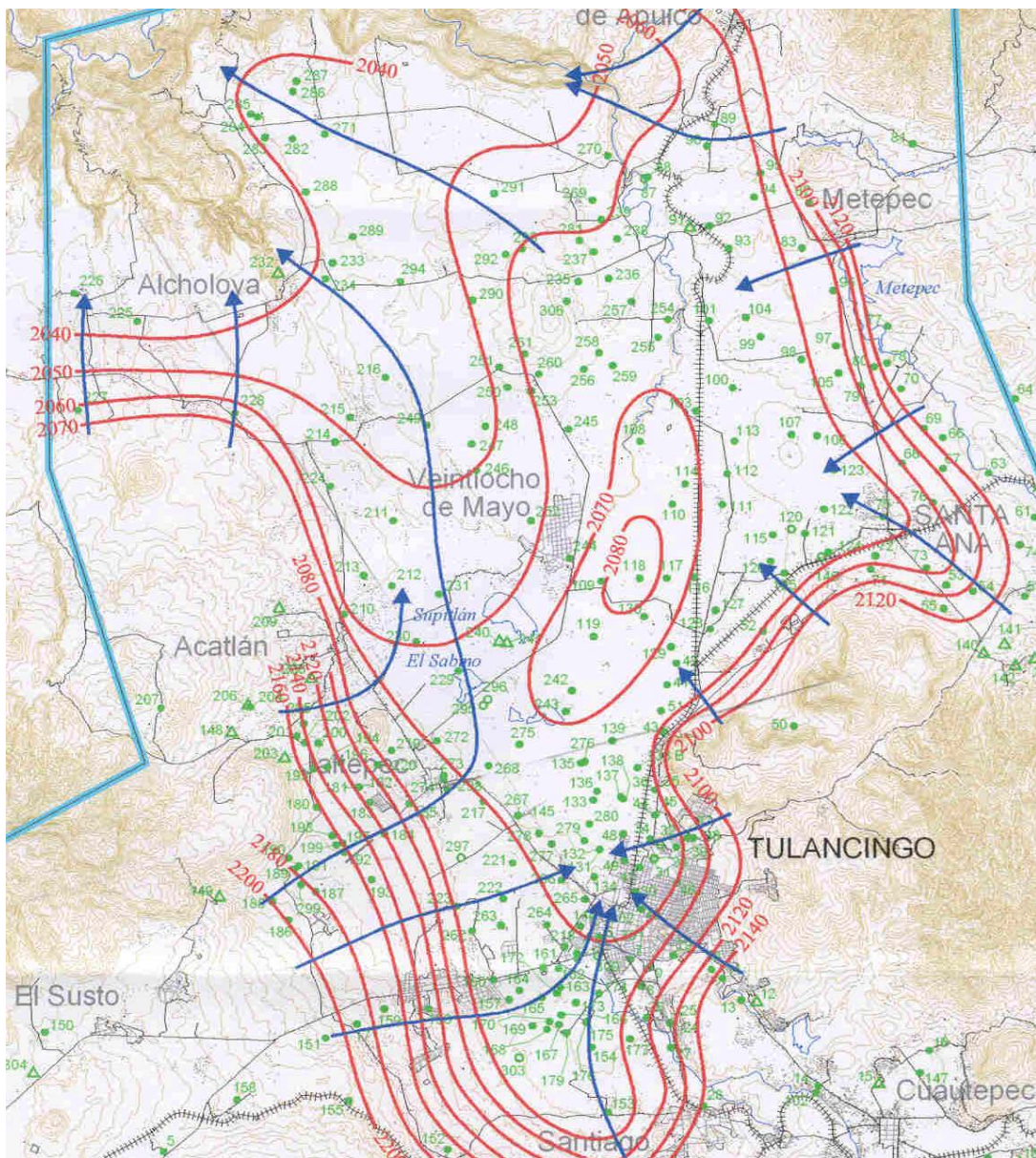


Figura 4. Profundidad al nivel estático

## ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO Y DIRECCIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

Para la configuración del 2006, se trazaron curvas de 2140 y 2200 msnm en el suroeste y sur del valle, las cuales descienden paulatinamente hasta la cota 2070 msnm a la altura de la Ciudad de Tulancingo donde se tiende a formar un cono piezométrico. En Santa Ana, las curvas bajan de la 2120 msnm al pie de las elevaciones topográficas, a la 2070 msnm en el valle, para posteriormente continuar bajando con un gradiente menos pronunciado rumbo a Alcholoya, donde se registró la curva 2020 msnm (figura 5). El flujo subterráneo circula inicialmente de las sierras del sur hacia el valle con un gradiente fuerte. Posteriormente continúa circulando por el valle hacia el norte con un gradiente suave. Recibe aportaciones de la periferia hacia el valle, excepto en el extremo norte donde presenta una salida hacia la zona de barrancas de Metztlán.



**Figura 5.** Elevación del nivel estático y dirección del flujo subterráneo



## EVOLUCIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO

Se calculó y trazó una configuración de la evolución del nivel estático para el periodo de 2000-2006 (Figura 6). En ella se observa que han existido abatimientos entre 0 y -6 metros para el periodo considerado. Lo mayores abatimientos se registran al norte del valle, entre Veintiocho de Mayo y Metepec, mientras que en la parte sur del valle no se ha registrado variación del nivel estático respecto al tiempo.

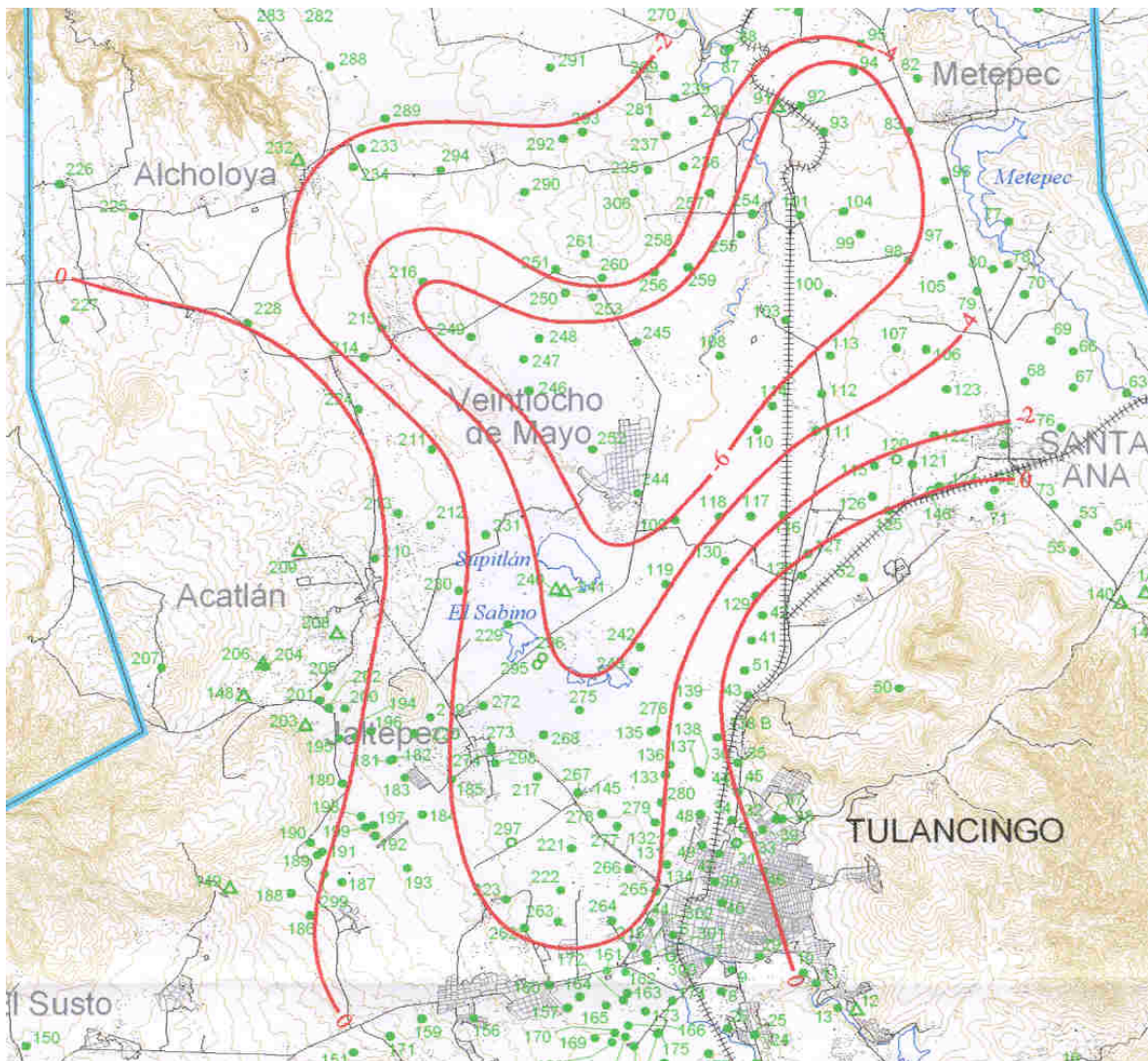


Figura 6. Evolución del nivel estático (2000-2006)

## TRANSMISIVIDAD

Se realizaron 44 pruebas de bombeo procurando repartirlas en toda la zona de estudio. Las gráficas y datos se pueden consultar en el informe integral. Los valores obtenidos son menores de  $1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en 19 pruebas; entre  $1.0$  y  $55 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en 21 pruebas. En 3 pruebas, la transmisividad obtenida fue entre  $74$  y  $610 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Una prueba resultó no interpretable (NI). La mayoría de las pruebas se interpretaron por el método de Hantush. Corresponden a un acuífero semiconfinado (figura 7).

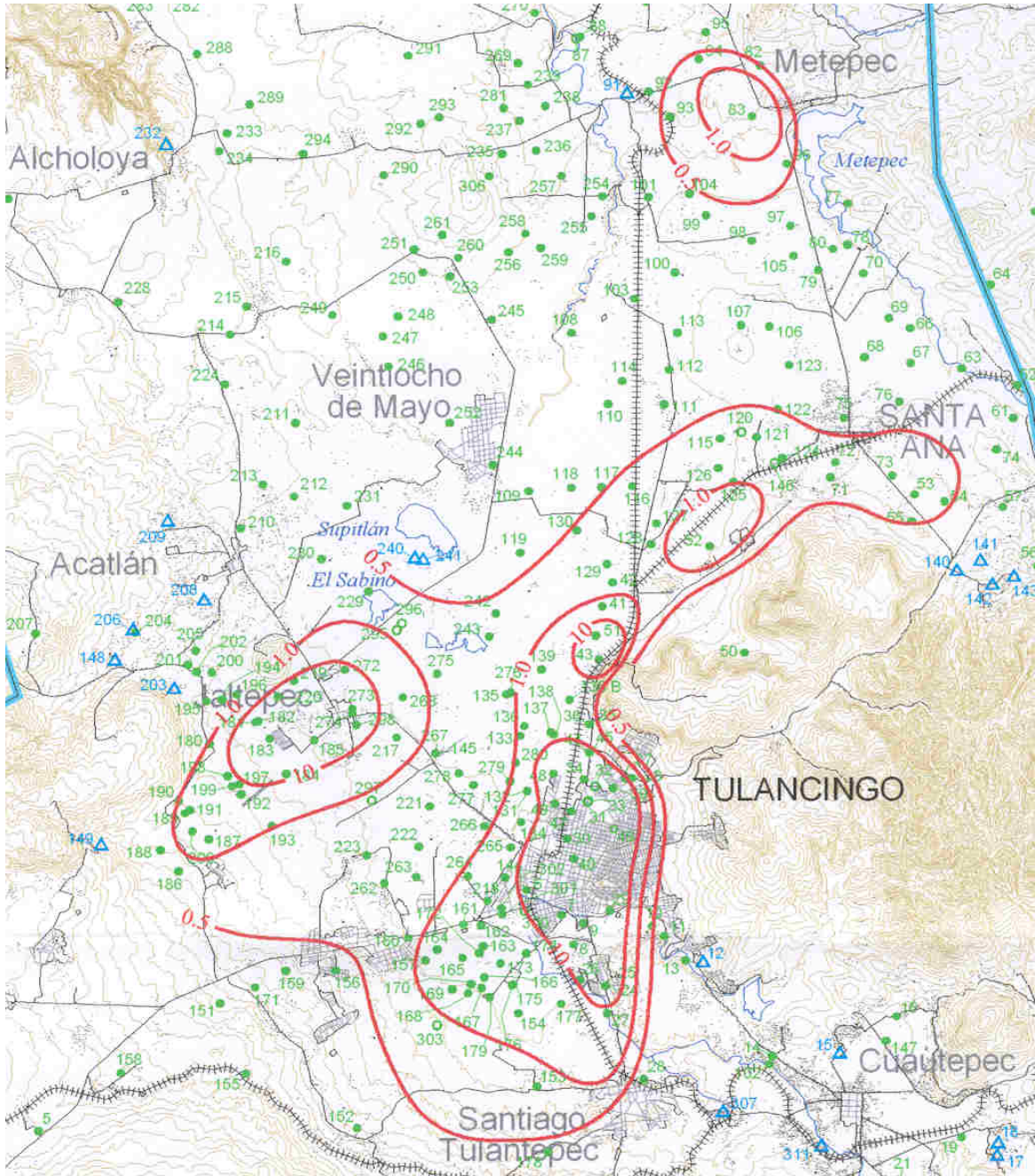


Figura 7. Transmisividad del acuífero ( $\times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )

## FUNCIONAMIENTO DEL ACUÍFERO

En la zona existen dos horizontes acuíferos. El primero se ubica prácticamente en todo el valle y es el principal acuífero en explotación, el cual se ha denominado en referencias anteriores como “acuífero profundo”. Existe un segundo acuífero denominado somero o colgado, con un espesor de entre 20 y 40 metros, formado por material volcánico-sedimentario de granulometría variable. La base de este acuífero somero corresponde a una colada de basalto muy compacta que se comporta como impermeable. Este acuífero somero fue identificado e incluso cuantificado en los estudios realizados a partir de los 70's.

Por lo que respecta al principal acuífero del valle o “acuífero profundo”, éste se encuentra alojado en una serie de capas de piroclásticos intercalados con tobas y aluviones de diferente granulometría, con espesores que llegan a alcanzar 300 metros. Se recarga a partir de la infiltración de agua de lluvia en las sierras que circundan el valle, principalmente la sierra del sur, a partir de donde circula en dirección norte para salir del valle en la zona de barrancas del norte del valle. En su trayectoria, parte del flujo subterráneo es extraído y utilizado tanto para uso potable como para industrias y riego. Parte del agua utilizada en riego se vuelve a incorporar al acuífero por infiltración en las áreas de cultivo agrícola. Existe un extensivo uso del agua en riego a través de canales.

Otra porción importante de acuífero, corresponde al que presenta su salida en los manantiales de Zupitlán, cuya agua se recarga y circula a través de las lavas y piroclásticos en la Sierra de El Milagro y circulan en dirección SW-NE, para aflorar en las lagunas de Zupitlán. En las Figuras 8.1 y 8.2, se muestran secciones NW-SE y W-E que ilustran el funcionamiento del acuífero. En ellas se observa el espesor de material saturado donde se aloja al acuífero, el nivel estático y la dirección de circulación del flujo subterráneo.

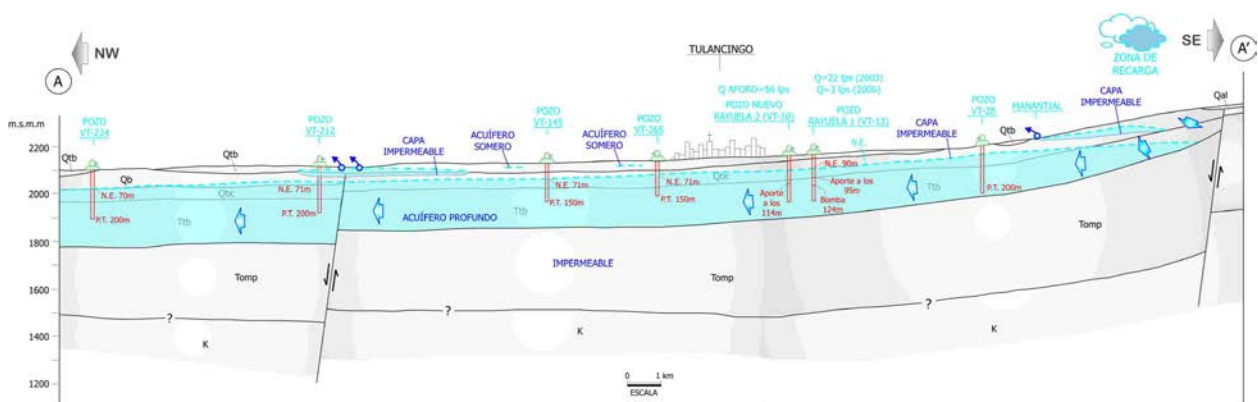
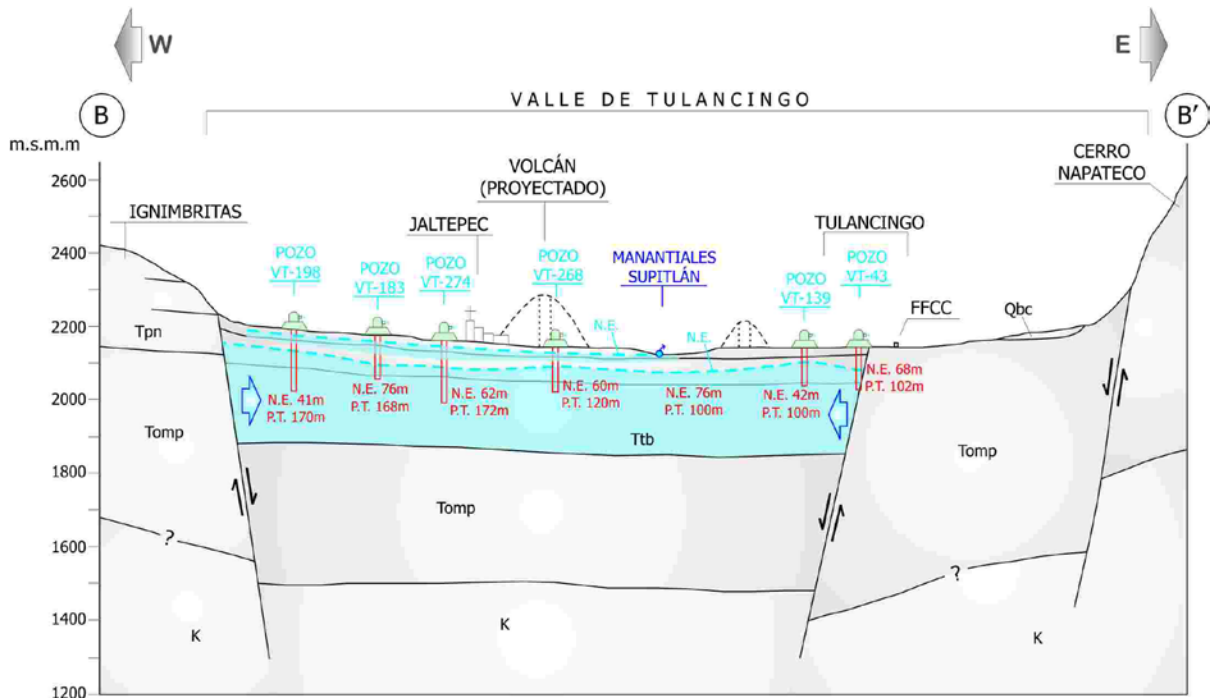


Figura 8.2 Sección geohidrológica NW-SE



**Figura 8.1** Sección geohidrológica W-E

### BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

Se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero en el cual las entradas de agua subterráneas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento. Se trazaron celdas para el cálculo del flujo subterráneo utilizando la configuración de la elevación del nivel estático. En cada una de las celdas se aplicó la Ley de Darcy para obtener la cantidad de agua que fluye a través de ellas, la cual es igual a:  $Q = TBi$ , donde  $T$  es la transmisividad expresada en  $m^3/seg$ ;  $B$  es el largo de las celdas;  $i$  es el gradiente hidráulico. En la figura 9 se muestran las celdas marcadas para el cálculo del flujo subterráneo en el valle de Tulancingo. Se consideraron 18 celdas de entrada identificadas como E-1 a E-18, ubicadas en la periferia al sur, oeste y este del valle. Se marcaron 4 celdas de salida por flujo subterráneo (S-1 a S-4), ubicadas hacia el norte del valle. Los datos para el cálculo de los caudales y volúmenes que circulan a través de dichas celdas, se muestran en la tabla 14.1, observándose que las entradas fueron de  $54.8 \text{ hm}^3/\text{año}$  y las salidas de  $4.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Se calculó la extracción del agua subterránea a partir de los datos del censo de aprovechamientos de agua subterránea y en la zona considerada para el balance, la cual ascendió a  $80.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

Se trazó la configuración de la variación del nivel estático respecto al tiempo para el período de 2000-2006. En base a esta configuración (figura 6) se calculó el área entre curvas, la cual se multiplicó por la evolución media anual y por un coeficiente de almacenamiento de 0.07, con lo cual se obtuvo un cambio de almacenamiento de  $-10.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

La infiltración se dedujo de la ecuación de balance, donde las entradas (entradas subterráneas + infiltración), son iguales a las salidas (salidas subterráneas + extracción + cambio de

almacenamiento). De la ecuación mencionada se despejó la infiltración vertical, se aplicaron los valores mencionados en los incisos anteriores y se obtuvo una infiltración de  $19.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

En la figura 9 se ilustran los resultados del balance.

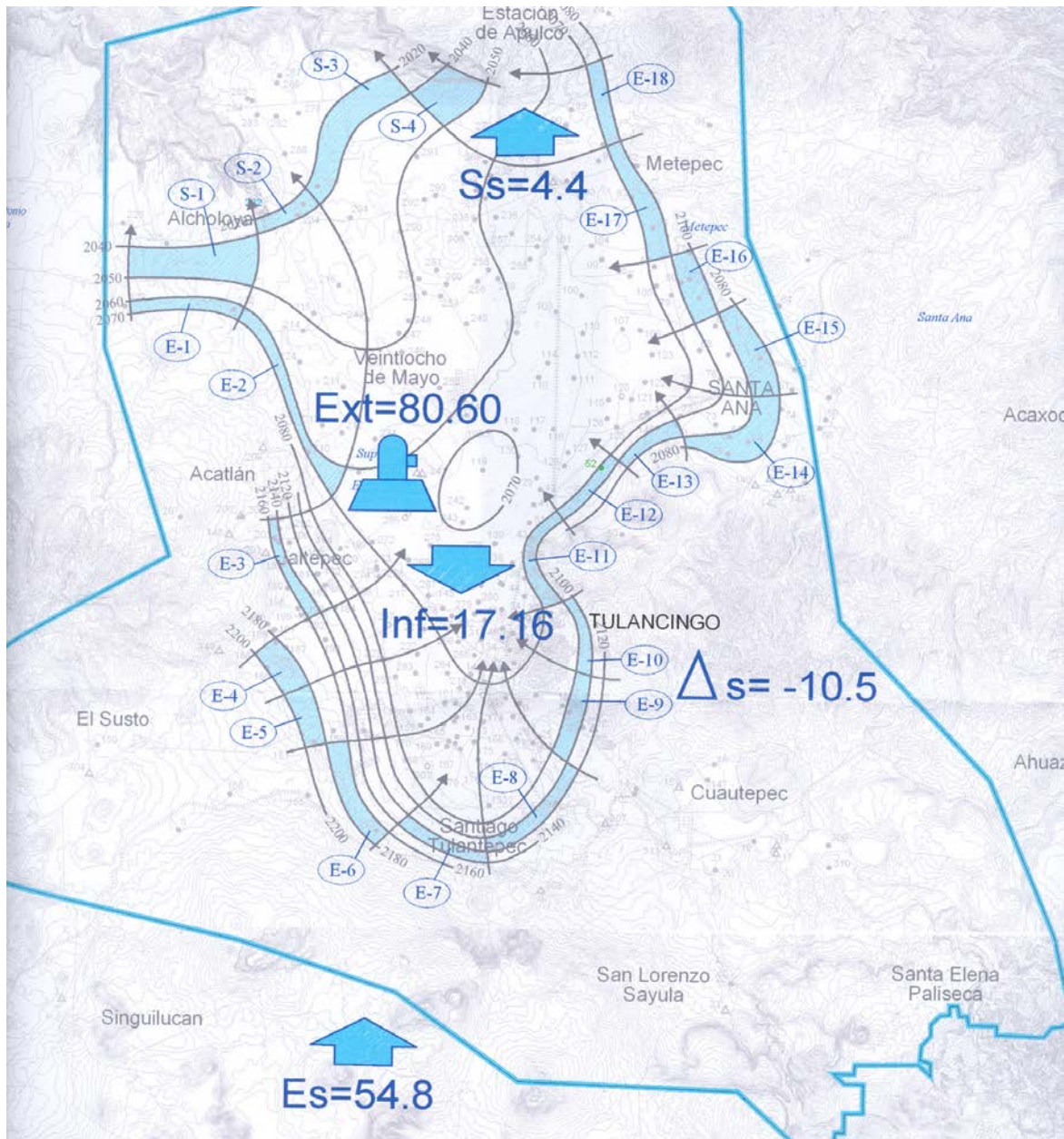
Entradas subterráneas  $54.8 \text{ hm}^3/\text{año}$

Infiltración  $19.7 \text{ hm}^3/\text{año}$

Extracción  $80.6 \text{ hm}^3/\text{año}$

Salidas subterráneas  $4.4 \text{ hm}^3/\text{año}$

Cambio de almacenamiento  $-10.5 \text{ hm}^3/\text{año}$



**Figura 9** Celdas para el cálculo del flujo subterráneo

## DISPONIBILIDAD DE ACUERDO A LA NOM-011

La disponibilidad media anual del agua subterránea, se determinó aplicando las especificaciones y el método señalado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, denominada "Conservación del recurso agua, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", en su fracción relativa a las aguas subterráneas. Conforme a dicha norma, la disponibilidad media anual se obtiene restando, a la recarga total, la descarga natural comprometida y los volúmenes de agua concesionados inscritos en el Registro Público de derechos de agua (REPGA).

En el acuífero de Tulancingo, la recarga media anual en la zona de balance es de  $74.5 \text{ hm}^3/\text{año}$  + la recarga que se genera fuera de esta zona pero dentro del acuífero y que corresponde principalmente a los manantiales de Ventoquipa y Almoloya que es de  $15.76 \text{ hm}^3/\text{año}$ , para una recarga total de  $90.26 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Se consideró una descarga natural comprometida que corresponde a la salida por manantiales, la cual asciende a  $34.68 \text{ hm}^3/\text{año}$  + las salidas subterráneas de 4.4 que suman 39.08. Por otra parte el volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPGA es de  $60,969,070 \text{ m}^3/\text{año}$  al 31 de enero del 2003 de acuerdo a publicación del Diario Oficial de la Federación. Por lo tanto, la disponibilidad media anual de aguas subterráneas queda como sigue:

Disponibilidad media anual de agua subterránea	=	Recarga media anual	-	Descarga comprometida	-	Volumen Concesionado
-9,789,070	=	90,260,000	-	39,080,000	-	60,969,070

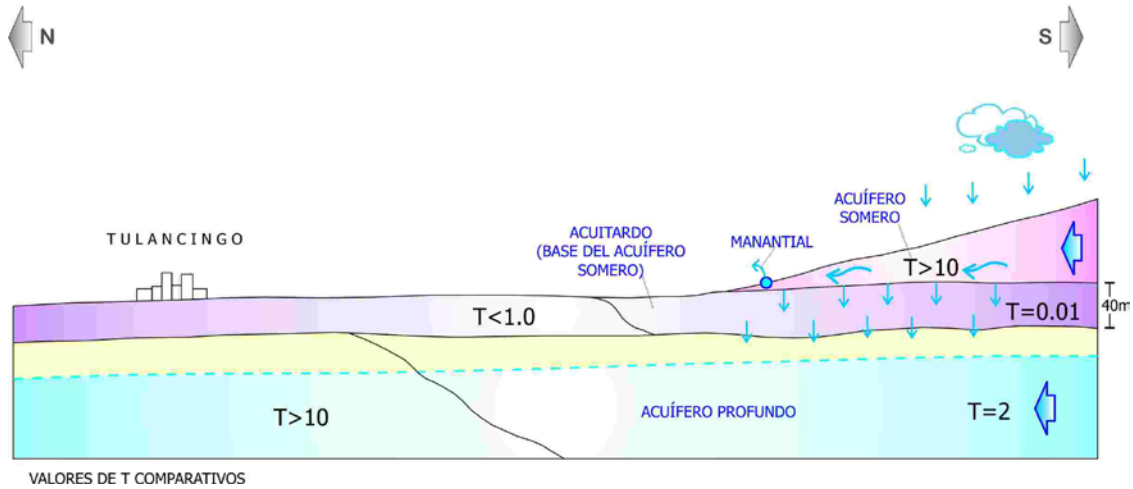
De lo anterior se desprende que en el acuífero de Tulancingo, no existe disponibilidad de agua subterránea, ya que el volumen concesionado es mayor que la recarga. Además de que existe sobreexplotación que ocasiona el abatimiento de los niveles.

## MODELO MATEMÁTICO DEL ACUÍFERO

Se elaboró el modelo matemático de flujo del agua subterránea del Valle de Tulancingo, actualizado al 2006 e integrado de tal manera que se le pueda dar seguimiento para su modificación, enriquecimiento y en general para su manejo. El paquete utilizado fue la última versión del Visual Modflow Premium 2006.

Para construir el modelo se inicia por definir el área que va a ser considerada, así como también la distribución de las formaciones geológicas con respecto a la profundidad. De esta manera se determina el número de capas que debe tener el modelo. Una vez identificadas las formaciones geológicas en extensión y profundidad, se les asignan sus propiedades hidráulicas apoyándose para ello en las pruebas de bombeo. También se identifican las fronteras hidráulicas y/o

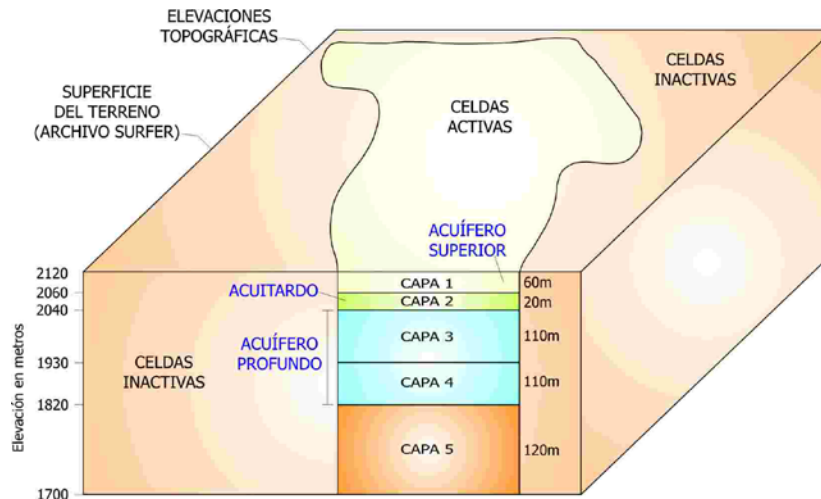
geológicas, así como las zonas de recarga y los puntos o zonas de descarga al acuífero. En la figura 10 se muestra el modelo conceptual de flujo del Valle de Tulancingo, que se tomó como base para la construcción del modelo. Para explicar de manera simplificada la construcción del modelo, se idealiza a la zona de estudio como un bloque rectangular en cuya parte superior se encuentra el Valle Tulancingo.



**Figura 10** Modelo conceptual de flujo del acuífero del Valle de Tulancingo

El interior del bloque representa el subsuelo con aproximadamente 420 metros de espesor de rocas y materiales divididos en 5 capas. El modelo requiere para su construcción, del tamaño y forma del acuífero, los cuales son alimentados al modelo mediante los archivos de la configuración de la superficie del terreno y las configuraciones de la base de cada una de las capas en que se divide el subsuelo.

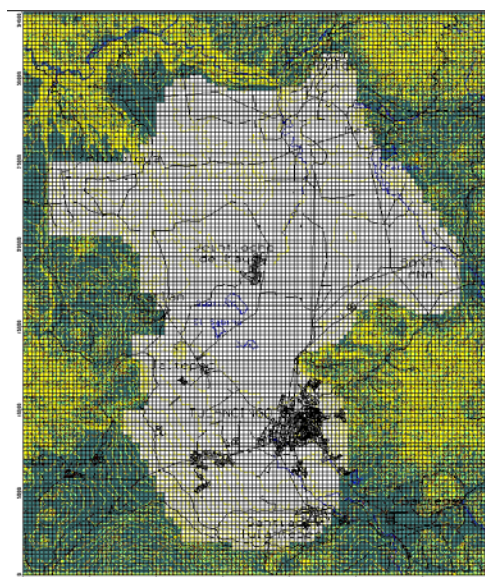
Respecto a la discretización vertical, se consideraron 420 metros de espesor, los cuales se dividieron en 5 capas (figura 11). La capa 1 corresponde al *acuífero superior* con un espesor de 60 metros. Como capa 2 se incluyó a un acuitardo de 20 metros de espesor que corresponde a la base del *acuífero superior*. El *acuífero inferior* y principal, corresponde a las capas 3 y 4, con un espesor total de 120 metros. Finalmente se consideró una capa 5 que simula a las rocas volcánicas de baja permeabilidad que subyacen al acuífero principal, a la cual se le asignó un espesor de 120 metros.



**Figura 11.** Modelo conceptual de flujo Valle de Tulancingo

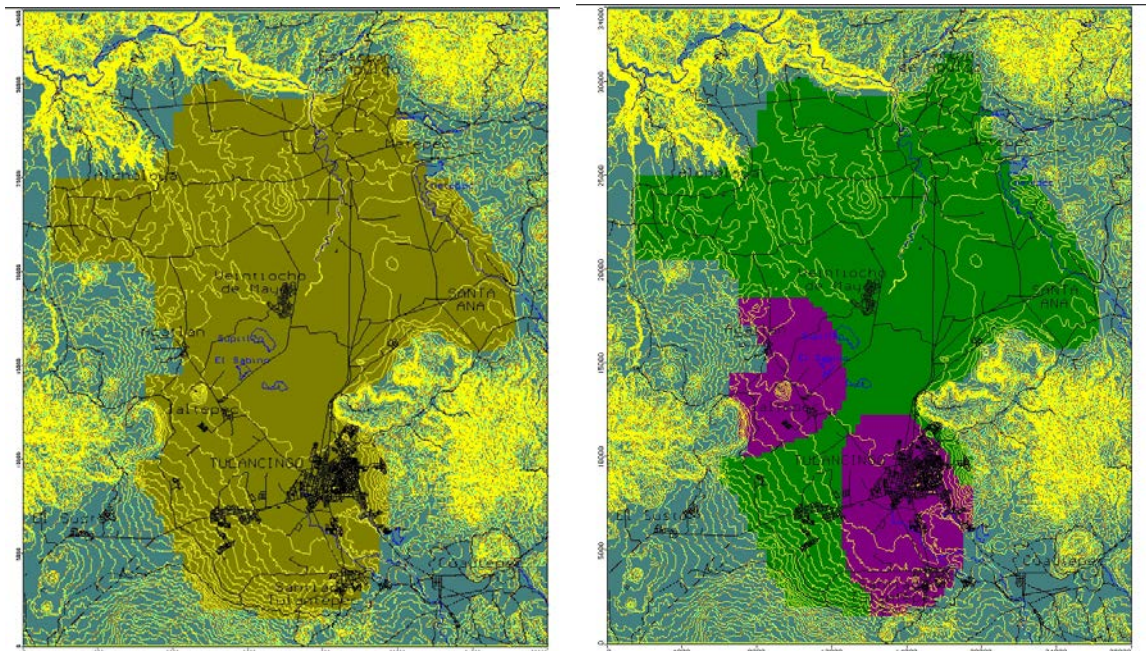
La información sobre los pozos, con la cual se alimentó el modelo, consistió de datos de pozos. Los pozos se ubicaron de acuerdo a sus coordenadas geográficas. Se identifican de acuerdo a su número local y se alimentaron con la profundidad de la zona ranurada o de aporte de agua al pozo y los gastos de extracción. Los datos pueden ser consultados en el informe integral.

Los valores de transmisividad del acuífero, se expresan en el modelo como conductividad hidráulica en m/s. Fueron obtenidos de la configuración de transmisividad y se presentan en las figuras 12.1 a 12.7. El coeficiente de almacenamiento se expresa en el modelo como rendimiento específico ( $S_y$ ) cuando este trabaja como acuífero libre y como coeficiente de almacenamiento ( $S_s$ ) cuando el modelo trabaja como acuífero confinado o semiconfinado. Estos parámetros se obtuvieron tanto de datos de campo, como de la granulometría de los materiales y de la literatura consultada, los valores utilizados se muestran en las figuras 13.1 a 13.5.



**Figura 12.1** Discretización del modelo





Figuras 12.2 y 12.3 Conductividad hidráulica (K) de las capas 1 y 2 respectivamente

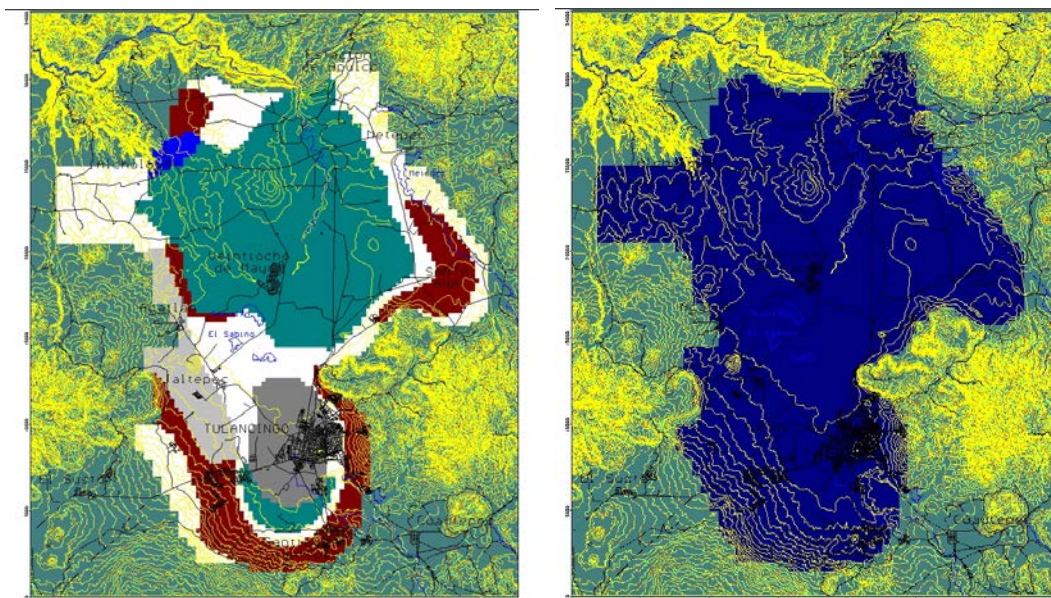
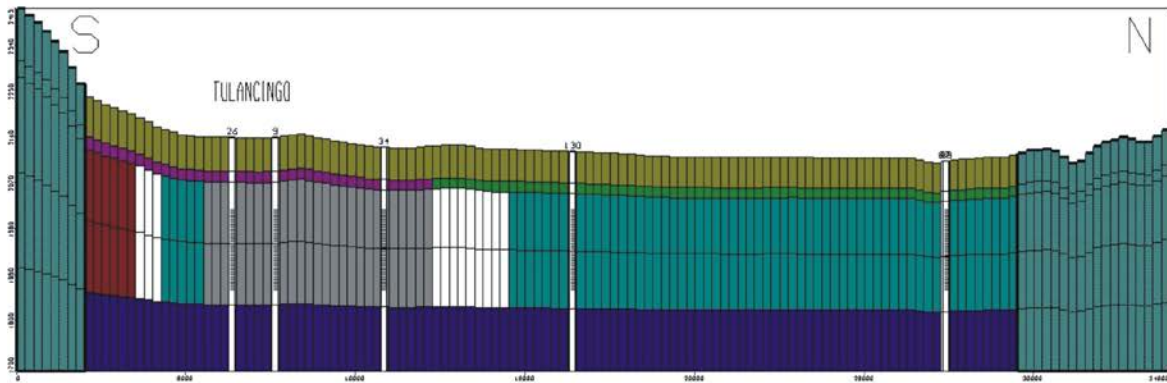
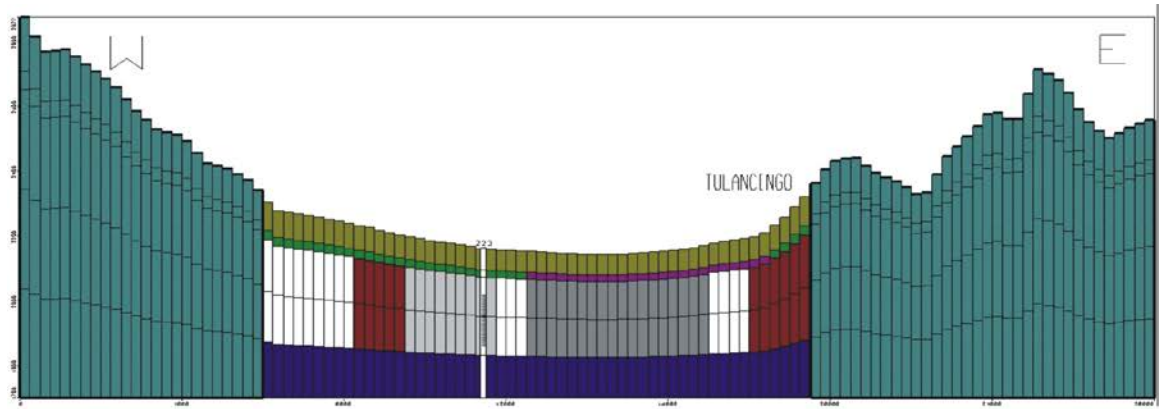


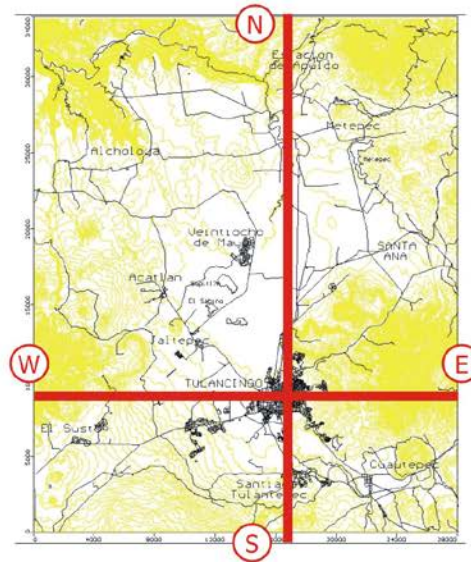
Figura 12.4 y 12.5 Conductividad hidráulica (K) de las capas 3 y 4, y de la capa 5 respectivamente

Conductivity						
Zone	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]	Active	D	
1	1E-5	1E-5	1E-5	<input checked="" type="checkbox"/>		
2	8E-8	8E-8	8E-8	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	1E-6	1E-6	1E-6	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	8E-5	8E-5	8E-5	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	3.5E-6	3.5E-6	3.5E-6	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	3E-7	3E-7	3E-7	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	1E-5	1E-5	1E-5	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	1E-6	1E-6	1E-6	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	0.0002	0.0002	0.0002	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	4E-5	4E-5	4E-5	<input checked="" type="checkbox"/>		

Figura 12.6 Valores de Conductividad hidráulica (K)



LOCALIZACIÓN DE LA SECCIÓN



**Figura 12.7** Secciones Oeste-Este y Sur-Norte mostrando la discretización vertical, pozos y zonificación de la conductividad hidráulica

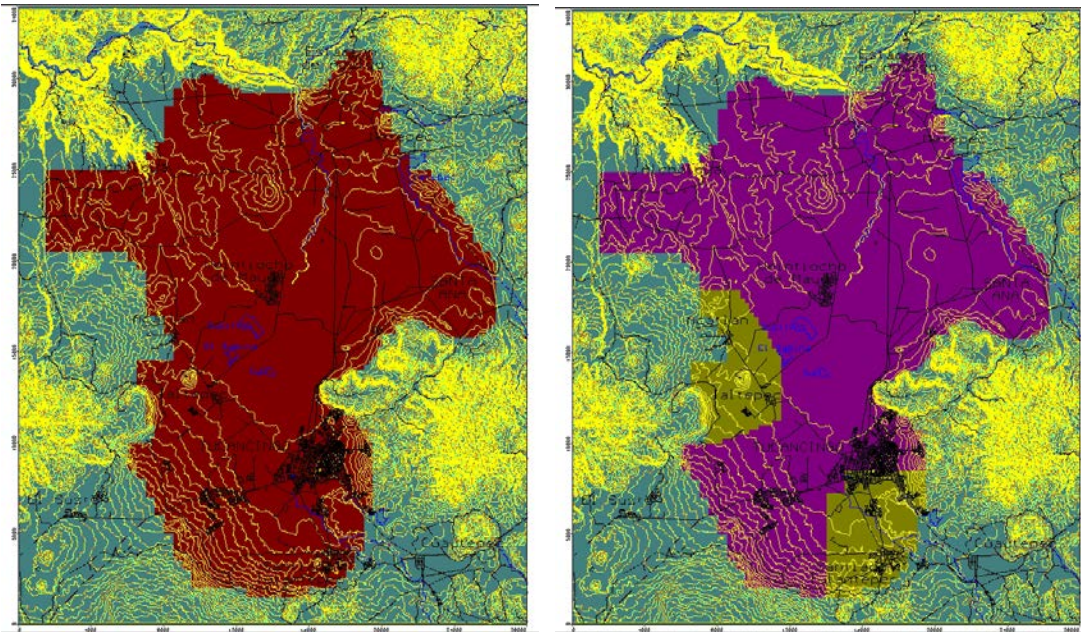


Figura 13.1 y 13.2 Almacenamiento ( $S_s$  y  $S_y$ ) de las capas 1 y 2 respectivamente

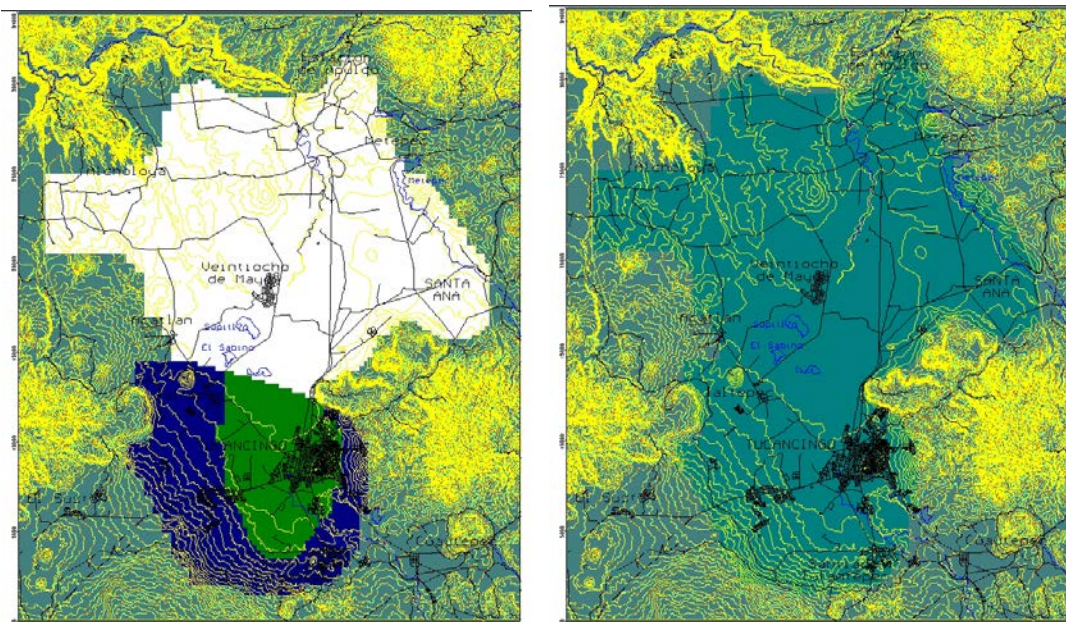


Figura 13.3 y 13.4 Almacenamiento ( $S_s$  y  $S_y$ ) de las capas 3 y 4 y de la capa 5 respectivamente

Storage						
	Zone	$S_s$ [1/m]	$S_y$ []	Eff. Por. []	Tot. Por. []	Active
▶	1	1.5E-5	0.08	0.2	0.2	✓
	2	1.5E-5	0.06	0.2	0.2	✓
	3	1.5E-5	0.1	0.2	0.2	✓
	4	1E-5	0.01	0.2	0.2	✓
	5	0.0001	0.1	0.2	0.2	✓
	6	1E-5	0.02	0.2	0.2	✓
	7	1E-5	0.01	0.2	0.2	✓

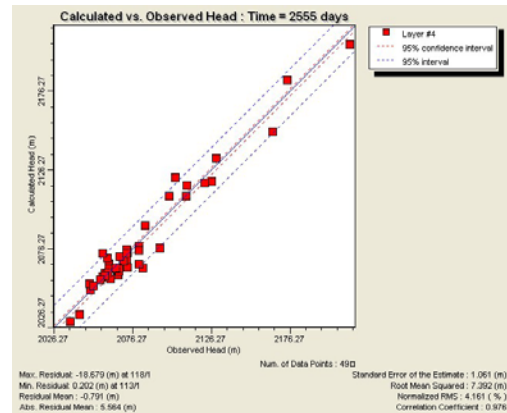
Figura 13.5 Valores de Almacenamiento ( $S_s$  y  $S_y$ )

Se utilizaron fronteras de carga lejana (GHB) ubicadas alrededor del valle, las cuales reflejan la entrada por flujo subterráneo como se obtuvo en el capítulo de balance de agua subterránea. La recarga vertical deducida a través del balance fue distribuida en el valle.

Se seleccionó el año 2000 como valores iniciales. Se realizó una primera corrida del modelo para el periodo comprendido entre los años del 2000 (condiciones iniciales) y el 2006, la cual fue calibrada por el método de ensayo y error, modificando valores de conductividad hidráulica y almacenamiento dentro de rangos aceptables, hasta obtener una configuración del nivel estático al año del 2006, semejante a la observada, momento en el que se consideró el modelo como calibrado. Una configuración que muestra la comparación entre los datos observados y los calculados se presentan en la figura 16.14. En la figura 16.15, se muestra la gráfica de los valores observados contra los calculados, observándose que se alcanzó un error RMS de 4.1%

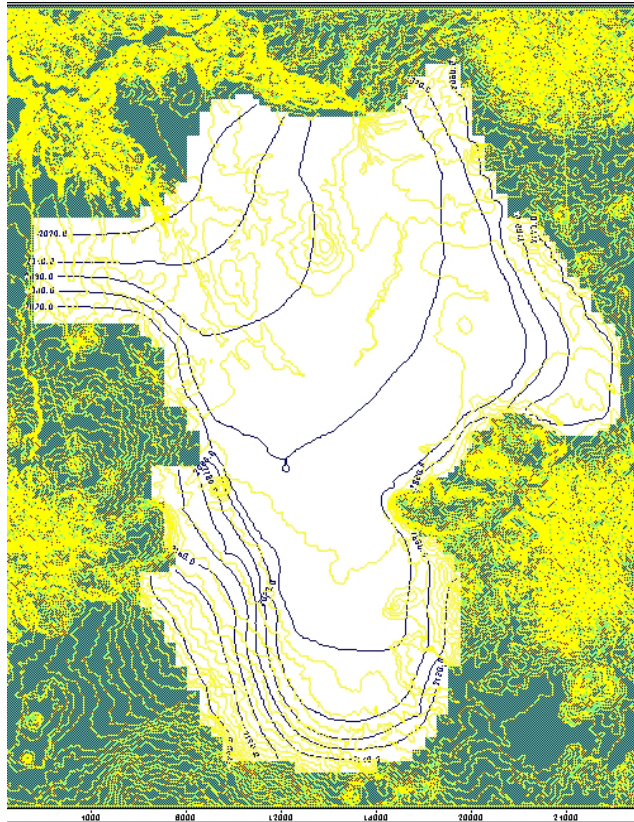


**Figura 14** Calibración 2000-2006.  
 Rojo – Elevación nivel estático observado  
 Azul – Elevación nivel estático calculado



**Figura 15** Resultado de niveles observados contra calculados en los pozos de observación para el año 2006.

Una vez calibrado el modelo, se realizó una corrida de simulación a 10 años, mediante la cual se obtuvo que, bajo las condiciones actuales, se tendrán abatimientos de alrededor de medio metro anual en la zona del valle (figuras 16).



**Figura 16** Predicción a 10 años (2016)

## CONCLUSIONES

El valle del acuífero se encuentra constituido por una alternancia de lavas de basalto y piroclásticos con más de 200 metros de espesor y cubiertos por una delgada capa de aluviones. Estos materiales son permeables y permiten la acumulación de agua subterránea. Ocasionalmente derrames de basalto compactos y capas de cenizas, ambos impermeables, se interdigitan con los materiales permeables. Las sierras circundantes al valle están formadas por rocas volcánicas impermeables del Terciario, tanto andesitas como riolitas.

El flujo subterráneo circula inicialmente de las sierras del sur hacia el valle con un gradiente fuerte. Posteriormente continúa circulando por el valle hacia el norte con un gradiente suave. Recibe aportaciones de la periferia hacia el valle, excepto en el extremo norte donde presenta una salida hacia la zona de barrancas de Metztlán.

La evolución del nivel estático para el periodo de 2000-2006, presentó abatimientos entre 0 y -6 metros, encontrándose los mayores abatimientos al norte del valle, entre Veintiocho de Mayo y Metepec, mientras que en la parte sur del valle no se ha registrado variación del nivel estático respecto al tiempo.

Existen dos horizontes acuíferos, denominados acuífero superficial y acuífero profundo. El acuífero somero tiene un espesor de entre 20 y 40 metros y, esta formado por material volcánico-sedimentario de granulometría variable. La base de este acuífero somero corresponde a una colada de basalto muy compacta que se comporta como impermeable. El principal acuífero del valle o acuífero profundo, se encuentra alojado en una serie de capas de piroclásticos intercalados con tobas y aluviones de diferente granulometría, con un espesor que llega a alcanzar 300 metros.

La recarga del acuífero se lleva a cabo a partir de la infiltración de agua de lluvia sobre las sierras que circundan al valle, principalmente la sierra del sur, a partir de donde el agua circula en dirección norte, para salir del valle en la zona de barrancas del norte (Metztitlán). En su trayectoria, parte del flujo subterráneo es extraído mediante pozos o bien, aflora en forma de manantiales.

Para el balance de agua subterránea, se consideraron 18 celdas de entrada ubicadas en la periferia al sur, oeste y este del valle, cuyo volumen ascendió a  $54.8 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Las salidas por flujo subterráneo en el norte del valle, son de  $4.4 \text{ hm}^3/\text{año}$ . La extracción del agua subterránea a través de pozos es de  $80.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ . El cambio de almacenamiento se obtuvo de la configuración de la evolución del nivel estático respecto al tiempo y utilizando un coeficiente de almacenamiento de 0.07, con lo cual se obtuvo un cambio de almacenamiento de  $-10.5 \text{ hm}^3/\text{año}$ . La infiltración se dedujo de la ecuación de balance, obteniéndose un volumen de  $19.7 \text{ hm}^3/\text{año}$ . La disponibilidad de agua subterránea en el acuífero de Tulancingo de acuerdo a la NOM-011 es negativa con un valor de  $-9.78 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

El modelo matemático indica que existirán abatimientos del nivel estático en 10 años, del orden de 3 metros en los alrededores de Tulancingo y de 10-14 metros al norte del valle, entre Veintiocho de Mayo y Metepec.