



*Comisión Nacional del Agua*

**Subdirección General Técnica**

*Gerencia de Aguas Subterráneas*

**Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos**

***DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD  
DE AGUA EN EL ACUÍFERO  
HUICHAPAN-TECOZAUTLA,  
ESTADO DE HIDALGO.***



**CONTENIDO**

		<b>Página</b>
<b>1</b>	<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
	<b>Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	4
<b>2</b>	<b>ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>8</b>
3.1	Provincia Fisiográfica.....	8
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía.....	9
3.4	Geomorfología.....	11
<b>4</b>	<b>GEOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología estructural.....	16
4.3	Geología del subsuelo.....	17
<b>5</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
5.1	Tipo de acuífero.....	21
5.2	Parámetros hidráulicos.....	21
5.3	Piezometría.....	22
5.4	Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	24
5.4.3	Evolución del nivel estático.....	28
5.5	Hidrogenoquímica y calidad del agua subterránea.....	29
<b>6</b>	<b>CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO.....</b>	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>34</b>
8.1	Entradas.....	34
8.1.1	Recarga natural.....	34
8.1.2	Recarga inducida.....	35
8.2	Salidas.....	36
8.2.1	Evapotranspiración.....	36
8.2.2	Descarga natural.....	36
8.2.3	Bombeo.....	37
8.2.4	Flujo subterráneo horizontal.....	37
8.3	Cambio de almacenamiento.....	37
<b>9</b>	<b>DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>38</b>
9.1	Recarga total media anual.....	38
9.2	Descarga natural comprometida.....	38
9.3	Rendimiento permanente.....	39
9.4	Volumen concesionado de aguas subterráneas.....	39
9.5	Disponibilidad de aguas subterráneas.....	39
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>40</b>

# **1 GENERALIDADES**

## **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, y de la CONAGUA.

El método que establece la NOM indica que para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas deberá de realizarse un balance de las mismas, donde se defina de manera precisa la recarga de los acuíferos, y de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

El cálculo de la disponibilidad obtenida permitirá una mejor administración del recurso hídrico subterráneo ya que el otorgamiento de nuevas concesiones sólo podrá efectuarse en acuíferos con disponibilidad de agua subterránea. Los datos técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información necesaria, en donde quede claramente especificado el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar, considerando los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el REPDA. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para fines de administración del recurso, para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, para los planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, y en las estrategias para resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

## **1.1 LOCALIZACIÓN**

El acuífero Huichapan-Tecozautla quedó designado con la clave 1307. El área del acuífero comprende una superficie aproximada de 1,448 km<sup>2</sup>, se localiza en la porción centro occidental del estado de Hidalgo, colindando hacia el norte y occidente con los estados de México y Querétaro. Figura No. 1.

Según sus límites, definidos por las coordenadas geográficas de los vértices reportados en la tabla No. 1, se localiza entre los paralelos 20° 08' 41'' y 20°39' 43.1'' y entre los meridianos 99°28'16.6'' y 99°51'28.7'' al oeste de Greenwich.

En la figura No.1 se muestran los municipios involucrados en el área del acuífero, donde se observa que prácticamente abarca la totalidad de los municipios de Huichapan, Tecozautla y Nopala de Villagrán, del estado de Hidalgo.



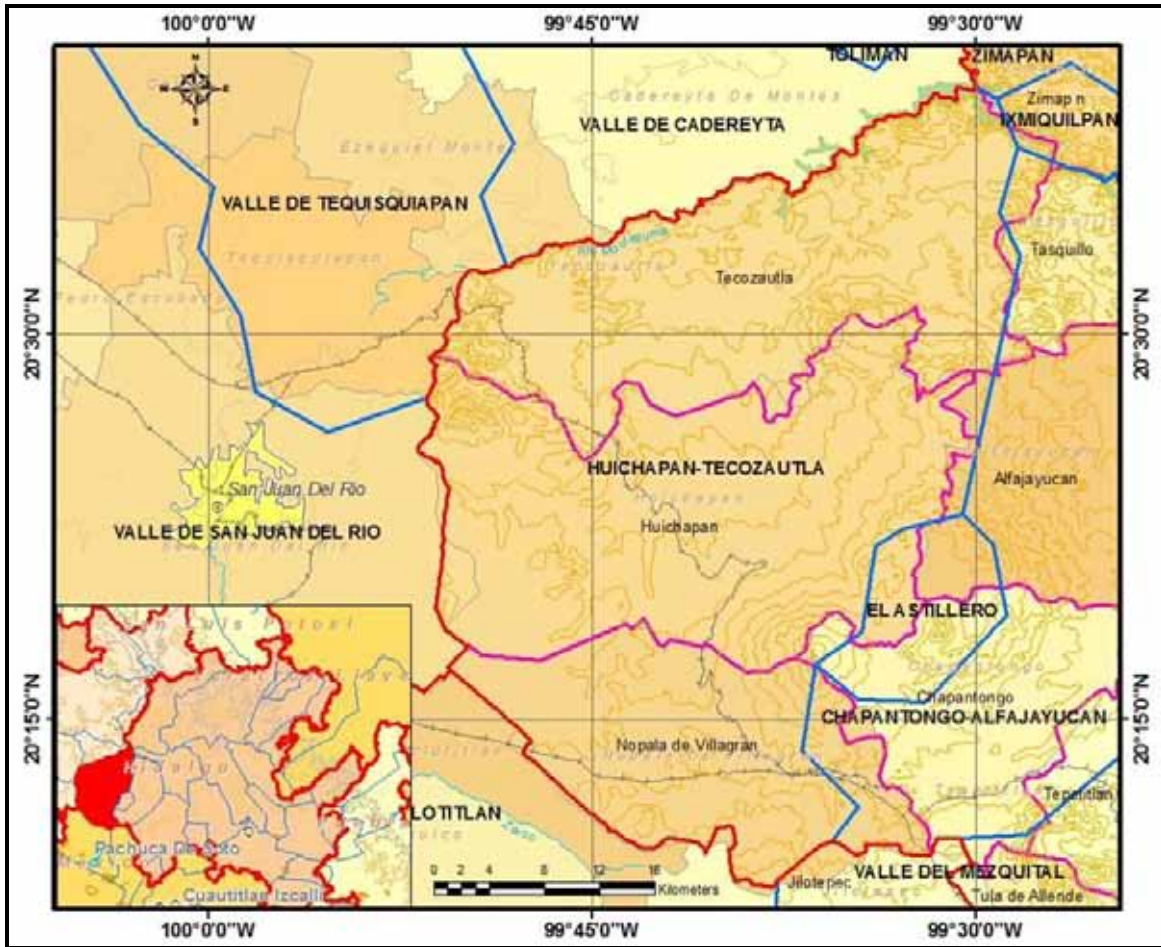


Figura No. 1. Municipios en el área del acuífero Huichapan-Tecozautla, Hgo.

Entre las principales poblaciones en el municipio de Huichapan se encuentran: Huichapan, Bondojo, Llano Largo, San José Atlán, Tlaxcalilla y Zothé, entre otros. En el Municipio de Nopala de Villagrán se destacan entre las principales poblaciones: Nopala de Villagrán, Loma Colorada y el Potrero. En el Municipio de Tecozautla se encuentran: Guadalupe, El Palmar, Bamanxotha, Gandha, Tecozautla y San Joaquín.

Según las estadísticas de la CONAPO el número de habitantes estimados para 2006 en el área, considerando los tres municipios antes mencionados, es del orden de 85,800 habitantes. Tabla No. 2.

**Tabla No. 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que definen el acuífero.**

**ACUIFERO 1307 HUICHAPAN-TECOZAUTLA**

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	28	24.5	20	37	17.4	
2	99	29	5.3	20	34	46.8	
3	99	28	16.6	20	33	6.4	
4	99	30	33.6	20	22	57.5	
5	99	32	54.5	20	22	24.6	
6	99	33	55.8	20	21	45.1	
7	99	34	27.4	20	18	22.1	
8	99	36	18.8	20	17	9.2	
9	99	36	48.1	20	13	45.0	
10	99	34	37.0	20	11	33.0	
11	99	35	40.7	20	10	11.0	DEL 11 AL 12 POR EL LIMITE ESTATAL
12	99	37	46.1	20	8	41.0	DEL 12 AL 13 POR EL LIMITE ESTATAL
13	99	50	31.2	20	16	53.4	DEL 13 AL 14 POR EL LIMITE ESTATAL
14	99	51	28.7	20	27	32.6	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	99	48	20.7	20	32	39.4	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	99	30	3.2	20	39	43.1	
17	99	29	13.4	20	39	12.7	
1	99	28	24.5	20	37	17.4	

**Tabla No. 2. Población municipal en 2006**

13029	Huichapan	39,333
13044	Nopala de Villagrán	15,810
13059	Tecoautla	30,689
	Suma	85,832

## 1.2 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO

Los municipios de Huichapan y Tecozautla, quedan comprendidos dentro de la zona de veda tipo III, declarada mediante el decreto "Terrenos que Ocupa y circundan a la población de Tecozautla", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de febrero de 1956. Este decreto establece que *"Excepto cuando se trate de alumbramiento para usos domésticos, a partir de la fecha en que este decreto entre en vigor, nadie podrá efectuar alumbramientos de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada sin previo permiso por escrito de la Autoridad del Agua, la que sólo lo expedirá en los casos en que de los estudios respectivos se deduzca que no se causarán los daños que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse"*.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos, 2007, los tres municipios: Huichapan, Tecozautla y Nopala de Villagrán, se localizan en zona de disponibilidad 4.

El acuífero de Huichapan-Tecoautla, pertenece a la Región Administrativa IX Golfo Norte, así como al Consejo de Cuenca del Río Pánuco. Actualmente cuenta con Comité Técnico de Aguas Subterráneas, instalado el 12 de septiembre de 2000.

## 2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

La zona Huichapan-Tecoautla ha sido motivo de numerosos estudios, sobre todo desde el punto de vista de las prospecciones geoelectricas resistivas.

El primero del que se tiene noticia se realizó en 1970, fue muy general y abarcó unos 8,000 km<sup>2</sup>; alcanzó a cubrir parte de la cuenca del río Hondo; el segundo estudio se realizó en 1973, consistió en un perfil térmico y geoelectrico resistivo, desde Huichapan hasta El Saucillo, con rumbo NE-SW, además de otros tres perfiles, únicamente geoelectricos, en el área entre Huichapan y San José Atlán, todos con un alcance de investigación a 200 m, con un total 129 sondeos eléctricos verticales. Se hace el señalamiento de que el agua subterránea circula por conductos o fracturas muy localizadas, *“sin constituir un manto extenso”*.

En diciembre de 1974 la compañía GEOFIMEX estudió, mediante prospección geofísica, la zona La Sabina, el cual complementa por medio de un perfil en la zona Huichapan-San José Atlán, que fue estudiada el año de 1973. Este perfil parte de Huichapan con dirección NW-SE y con una longitud de 6 600 m y 200 m de profundidad de investigación.

En diciembre de 1978, la compañía GEOCALLI realizó un trabajo geohidrológico que cubrió una superficie de 1100 km<sup>2</sup> aproximadamente, incluyendo hacia el sur parte del municipio Nopala de Villagrán. El estudio consideró aspectos piezométricos y pruebas de bombeo, así como recomendaciones para la exploración y explotación de los acuíferos en cuatro zonas.

Resulta de interés señalar que en este trabajo los sistemas de flujo que forman parte de los sistemas acuíferos regionales son controlados por fallas, fracturas y cambios litológicos: *“siendo indudable que se establecen direcciones preferenciales”*. Del reconocimiento de la barranca del río San Juan, se dice que ésta representa el nivel de descarga de los acuíferos en la zona de Tecozautla, pues a lo largo de su curso aparecen manantiales perennes que brotan de fracturas en ambas márgenes, destacando los identificados como Higuera y Taxhido, que en conjunto aportan unos 900 l/s. Menciona que dentro de la zona los escurrimientos del río San Juan no tenían aprovechamiento.

En 1986 se realizó otro estudio geoelectrico en Jonacapa. Describe la presencia de rocas ígneas extrusivas básicas, intermedias y ácidas, predominando las primeras con sus respectivos depósitos piroclásticos asociados, establece que: *“la mayoría de estas rocas carecen de condiciones satisfactorias para la formación de acuíferos, que se presentan únicamente en zonas de fracturamiento o bien en piroclásticos poco consolidados que serían de rendimientos muy bajos”*.

En 1988, se realizó un estudio geohidrológico para el Valle de Huichapan e incluye a la Caldera El Astillero, enfocado al abastecimiento de agua para la población de Huichapan.

Coincide con opiniones de que los acuíferos se encuentran contenidos en rocas de origen volcánico con fracturamiento, puntualizando que en la zona El Taguá el acuífero está contenido en las tobas Donguinyó e ignimbritas, mientras que en la caldera El Astillero se alojan en rocas basálticas y andesitas basálticas fracturadas.

El balance de aguas subterráneas arrojó un superávit de 2.2 hm<sup>3</sup>/año en El Astillero y de 4.6 hm<sup>3</sup>/año en Huichapan, sin provocar un minado de los acuíferos.

Posteriormente, en 1990, la empresa. Geofimex, S.A., realizó un estudio de prospección geoelectrica que abarcó 14 zonas con el propósito de abastecer agua a Huichapan y poblados vecinos, con una profundidad de investigación mínima de 350 m. En este mismo año la Compañía Geofimex llevó a cabo otro estudio en las zonas Ninthí, Apartadero y El Tendido.

En 1990 la empresa Exploraciones Coordinadas hizo una exploración geofísica de tipo resistiva, para diversas zonas del estado de Hidalgo. Comprendió zonas de la parte sur del estado, denominadas: Huichapan, Chicavasco, Ignacio Zaragoza, Pino Suárez, San José Cacaloapan y Tulancingo, y su objetivo fue facilitar la localización de sitios para perforar pozos. Se realizaron 87 SEV's repartidos en esas zonas, con una profundidad de investigación del orden de 700 m. Se abordan aspectos geológicos y de exploración geofísica, para finalmente recomendar sondeos exploratorios a diferentes profundidades.

En 1993 la empresa Sistemas y Proyectos Futura, S.A. de C.V. realiza trabajos de piezometría en los valles de Huichapan y Tecozautla. Sólo se consignan tablas con las observaciones piezométricas realizadas.

En 1996, la empresa Lesser y Asociados realizó un estudio geohidrológico, que abarca desde Nopala hasta Tecozautla, al parecer enfocado a dotar de agua al poblado de Nopala. Como antecedentes se cita que para esa fecha ya se habían construido varios pozos con diversos resultados: en cuatro se lograron gastos del orden de 30 l/s, y en el resto, no se dice cuántos, los caudales eran bajos o sufrieron agotamiento durante los aforos, con niveles estáticos entre 90 y 200 m.

Distinguen cinco zonas acuíferas: Tecozautla, Pathecitos, San Francisco, Nopala y El Astillero, calificados como pobres.

El trabajo realizado en 1999, denominado Estudio Hidrogeológico de la Zonas Tecozautla, Huichapan, Nopala, estado de Hidalgo, presentó algunas recomendaciones y conclusiones que se indican a continuación. Fue elaborado por Ariel Consultores S.A. Sus objetivos principales fueron: la determinación del potencial del recurso hídrico, el nivel de explotación del acuífero o sistemas de acuíferos, delimitando áreas donde pudieran incrementarse las extracciones. Los resultados más relevantes que se señalan en el estudio fueron:

Se distinguieron tres áreas acuíferas que manifiestan características diferentes entre si. El factor tectónico estructural juega un papel relevante en la geohidrología regional, ya que la intensidad y dirección de los esfuerzos, la disposición del fracturamiento, son los aspectos más importantes.

Dentro de la complejidad geológica de la cuenca del río Hondo se pueden establecer las siguientes unidades hidroestratigráficas: la constituida en la unidad litológica de andesitas; le siguen en importancia los basaltos y andesitas basálticas, y las tobas Donguinyó, siempre y cuando estén fracturadas.

Al hablar de acuíferos en la cuenca del río Hondo, debe entenderse de antemano que son modestos en productividad. Los constituidos en las franjas que marcan las fallas y fracturas son más redituables; sin embargo, ninguno de los pozos perforados en acuíferos bajo estas condiciones ha producido más de 60 l/s como caso excepcional; la productividad promedio es de alrededor de 25 a 30 l/s.

Las restantes unidades litológicas funcionan, por su baja permeabilidad, como fronteras de los acuíferos y barreras al flujo subterráneo. Cuando se han perforado pozos en estas unidades las productividades logradas han sido muy bajas, pues no llegan a los 10 l/s; es más, muchos de ellos se han considerado pozos "fallidos" cuando no proporcionan ni los 5 l/s.

La captación del recurso hídrico superficial se ve limitada por la topografía local, por los materiales aflorantes y sus afectaciones por fallas y fracturas, en general se puede decir que la captación de aguas superficiales queda reducida a pequeños bordos con poca capacidad de almacenamiento. Ante esta situación, cobra mayor relevancia la importancia estratégica que tienen las aguas subterráneas para el desarrollo regional, pues representan, a pesar de las grandes dificultades que ofrece su explotación, un recurso más fácil de captar.

En relación con el acuífero en la zona El Astillero y Nopala, se localiza en la porción sureste de la cuenca del río Hondo, en sus partes más altas. Al parecer está constituido en la unidad geoelectrica, correlacionada con andesitas basálticas y basaltos, materiales fracturados, a profundidades del orden de 90 m, después de atravesar el delgado aluvión, tobas y tobas arenosas. Funciona como acuífero libre a semiconfinado, y los niveles estáticos se localizan entre 60 y 80 m de profundidad. Los caudales bombeados son variables y dependen del potencial del acuífero así como del equipo instalado, pueden alcanzar 30 a 40 l/s, con rendimientos específicos del orden de 0.5 lps/m. La explotación a que ha sido sujeto el acuífero rebasa ligeramente la recarga natural, razón por la que se han manifestado abatimientos a través del tiempo, que pueden fijarse entre 0.25 y 0.50m anuales.

En relación con el acuífero que se desarrolla en lo que puede considerarse el valle de Huichapan, es indudable que su aprovechamiento representa uno de los problemas más complejos por su funcionamiento y grado de dificultad para captar las aguas subterráneas. Aquí es donde se aprecia fácilmente que el factor tectónico estructural juega un papel relevante, pues es en las franjas de fallas y fracturas, donde sólo es posible captar aguas subterráneas en volúmenes relativamente importantes.

El acuífero está constituido en materiales diversos, sobre todo en andesitas fracturadas, a profundidad; funciona como libre, semiconfinado y quizá confinado en algunas áreas. Los pozos existentes bombean un volumen de 15.6 hm<sup>3</sup> anuales en el municipio de Huichapan, mismos que al parecer no han generado abatimientos piezométricos.

Del funcionamiento de este acuífero se desprenden los siguientes resultados generales: la unidad geoelectrica 3, considerada con buena permeabilidad secundaria a través de las fracturas, tiene un considerable espesor en la mayoría de los perfiles realizados en la zona, por lo que puede considerarse potencialmente explotable, especialmente en los sitios donde sus valores de resistividad tienden a ser más bajos a causa del fracturamiento.

En cuanto al acuífero de la zona Tecozautla-Gandho, está emplazado en andesitas y andesitas basálticas, materiales ígneos fracturados, donde generalmente funciona como libre y semiconfinado. Según los resultados de prospección geofísica, estos materiales se identificaron con la unidad litológica de andesitas, con intercalaciones de brechas y aglomerados.

Aquí se tiene un gran número de pozos que bombean un volumen de 29.1 hm<sup>3</sup> anuales en todo el municipio de Tecozautla. El flujo principal subterráneo es de sur a norte, apuntando al cauce del río San Juan, infiriéndose salidas subterráneas que seguramente llegan al cauce de dicho río, aunque a un nivel inferior al lecho y por eso no se observan en superficie.

Las pruebas de bombeo indican una transmisividad entre 8 a 15 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Del balance de aguas subterráneas realizado en una superficie que casi abarca todo el acuífero en la zona de Tecozautla-Gandho, se concluye que está en un nivel de sobreexplotación, a razón de 4.7 hm<sup>3</sup> anuales. Este sobre bombeo es el que está generando un abatimiento paulatino de los niveles piezométricos.

Una actualización del estudio en la zona del acuífero Huichapan-Tecozautla, fue realizada en el año de 2006. Los objetivos del estudio fueron realizar el censo de captaciones de aguas subterráneas, cuantificación de los volúmenes de extracción para los diferentes usos, obtener información acerca de los parámetros hidrodinámicos que gobiernan el movimiento del agua subterránea en el subsuelo, definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, plantear el balance de aguas subterráneas para calcular el valor de la recarga media anual que recibe el acuífero y aplicar la NOM-011-CNA-2000 para determinar la disponibilidad media anual de aguas subterráneas.

Los abatimientos mayores del nivel del agua subterránea se presentan en las inmediaciones de las poblaciones de Huichapan y Tecozautla, con valores superiores al metro anual. El balance obtenido en este estudio muestra el minado de unos 29 hm<sup>3</sup>/año, valor que se concentra en las zonas mencionadas y adicionalmente en Taghí-Caltepanitla.

### **3 FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 PROVINCIA FISIAGRÁFICA**

El acuífero Huichapan-Tecozautla se encuentra contenido en la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano. Esta provincia se caracteriza por tener una orientación regional este-oeste, que cruza la República Mexicana desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México, franja situada entre las latitudes de 19° 00' y 20° 30', con una longitud de 1000 kilómetros y una amplitud variable que va de los 50 a los 200 kilómetros.

Las elevaciones más prominentes que se observan en el área están constituidas por aparatos volcánicos, domos ígneos, volcanes compuestos y conos cineríticos; entre los más importantes son de mencionarse: la Caldera de Huichapan o El Astillero y el estratovolcán constituido por el cerro La Estancia, los cuales presentan las elevaciones máximas en la región.

#### **3.2 CLIMA**

El clima imperante en la región Huichapan-Tecozautla-Nopala se clasifica como seco o estepario, con lluvias en verano e invierno seco, según los criterios de Köppen y Enriquetta García.

La temperatura media anual, según los datos de las estaciones presentadas en la tabla No. 3, es de 16.8 °C y la precipitación media de 544 mm anuales.

##### **Temperatura media anual**

La temperatura media anual varía desde 14° C, en las partes altas donde se ubica Nopala, hasta unos 18° C en las partes bajas, a la altura de Tecozautla, como se puede observar en la figura No. 2, siendo los meses más calurosos de mayo a octubre, en tanto que las temperaturas mínimas medias mensuales ocurren de noviembre a febrero inclusive.

**Tabla No. 3. Valores medios de la precipitación y temperatura registrados en estaciones climatológicas**

	Estación	Precipitación media mm		Temperatura media ° C	
		Promedio	Años con datos	Promedio	Años con datos
13012	HUICHAPAN, HUICHAPAN	391.0	48	15.5	47
13023	PATHE, TECOZAUTLA (CFE)	412.0	10	19.7	10
13053	TECOZAUTLA, TECOZAUTLA	463.6	14	19.4	14
13072	ESC.TEC.AGROP.27, NOPALA	967.3	6	15.2	6
13076	JONACAPA, HUICHAPAN	522.3	23	15.4	24
13083	PRESA MADERO, HUICHAPAN	508.6	29	15.7	29
<b>Promedio</b>		<b>544.1</b>		<b>16.8</b>	

### Precipitación media

La precipitación pluvial, de acuerdo al estudio de 1999, es en promedio del orden de los 550 mm anuales, variando desde casi 700 mm anuales en las partes altas hasta 500 mm en las partes bajas, tal como se muestra en la figura No.3; la temporada lluviosa se presenta durante los meses de junio a septiembre.

Por otra parte, si se consideran las Isoyetas normales anuales del área para el período 1930-1990, como se muestra en la figura No.3, los valores de precipitación oscilan entre 500 y 700 mm anuales, sin embargo el valor medio es del orden de 544 mm.

### Evaporación potencial media anual

La evaporación potencial media varía entre 800 mm/año en Huichapan y 1813 mm/año en la Presa Madero.

## 3.3 HIDROGRAFÍA

En el área existen una serie de ríos, como el Río Hondo, los cuales en su mayoría escurren con dirección general de sur a norte, hacia la confluencia con el río San Juan, corriente principal que drena hacia fuera del área y que se une con el río Tula. Es a partir de este sitio donde se denomina río Moctezuma.

De acuerdo con los criterios de la hidrología superficial, el acuífero Huichapan-Tecozautla pertenece a la Región Hidrológica 26, Pánuco.

Pertenece a la Subregión 26, Bajo Pánuco. Cuenca del río Moctezuma. Subcuenca Río Hondo.

En el área existe poca infraestructura hidráulica para aprovechar los recursos hídricos superficiales generados en la misma zona, sólo se localiza la presa Francisco I. Madero, ubicada sobre el río Hondo. Existen además algunos canales, así como obras afines. En cuanto al aprovechamiento de agua subterránea, existen pozos para la extracción y algunos de tipo geotérmico para evaluar el potencial de los fluidos termales.

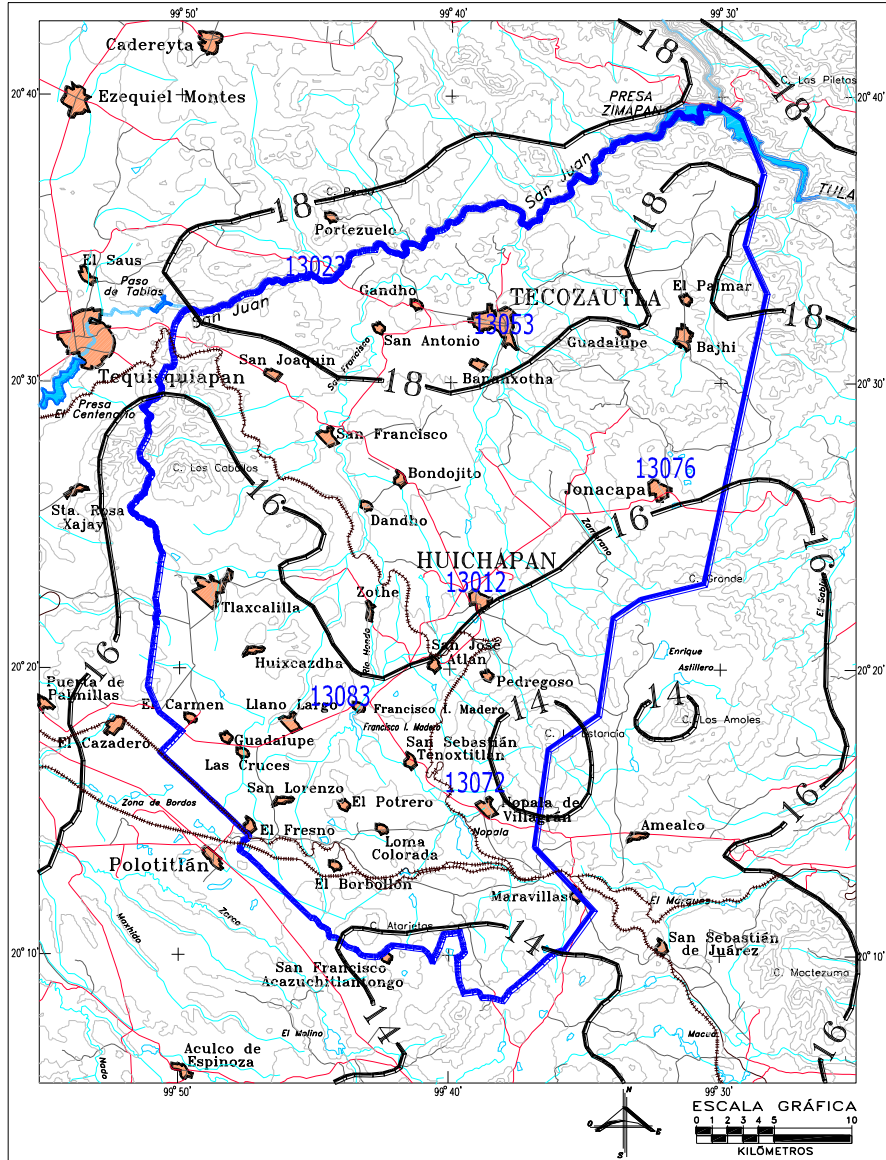


Figura No. 2. Isothermas medias anuales (°C)



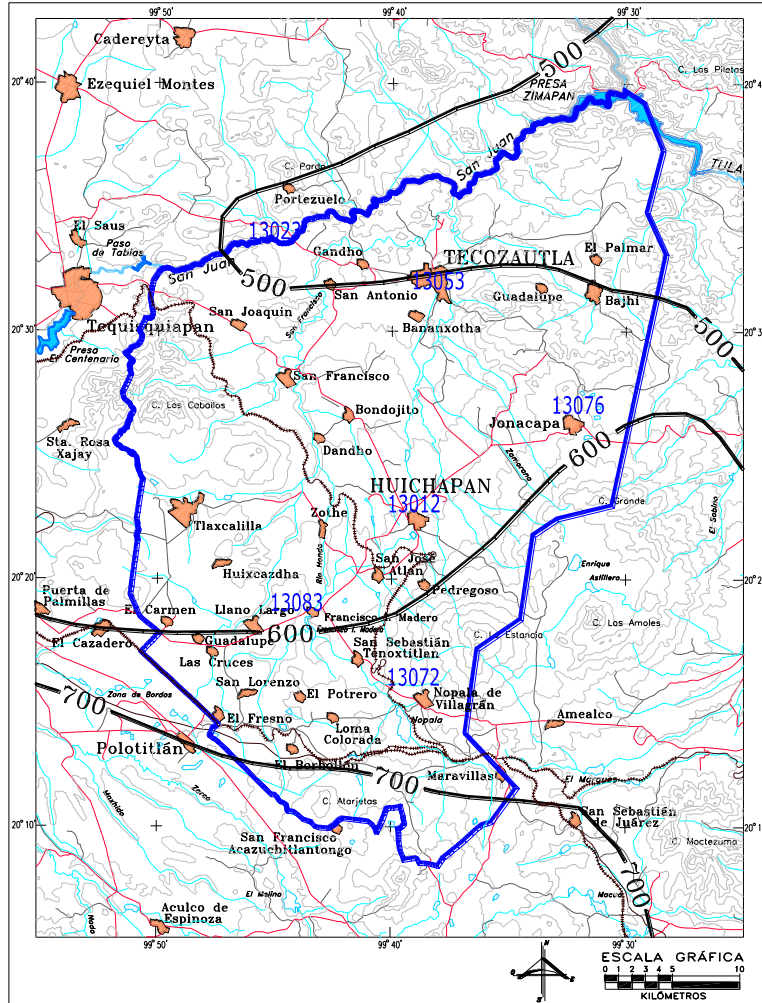


Figura No. 3. Isoyetas medias anuales (mm/año)

### 3.3 GEOMORFOLOGÍA

La caracterización geomorfológica de una zona consiste en la descripción cualitativa de distintos parámetros morfológicos como son patrones de drenaje, grado de las pendientes, altitudes, perfiles, etc., con lo cual es posible establecer a su vez ciertas características hidrológicas del terreno como son la identificación de zonas de recarga y descarga.

Con base en lo anterior, se identificaron tres unidades geomorfológicas principales: la porción de valle o llanura; en la parte norte, el conjunto de lomeríos y mesetas; en la porción central y occidental del área y, el conjunto de cerros hacia el sureste del área. Las características de estas unidades se describen a continuación:

#### Valle o llanura (V)

La zona del valle se extiende principalmente en la porción norte del acuífero, con algunas entrantes hacia la parte nororiental, al oriente de Tecozautla. Este sector, relativamente bajo, corresponde con las rocas cretácicas que afloran en las inmediaciones de la presa Zimapán.

Dentro del valle se distinguen diferencias de altitud respecto al nivel del mar en distintas porciones; por ejemplo, en la zona de la presa Zimapán los valores más bajos son de 1,500 msnm mientras que, al sur y suroeste de la localidad de Tecozautla se tienen alturas de 2,033 msnm. El drenaje en general se puede considerar de muy baja densidad, destacando solo algunas corrientes como los ríos San Juan y San Francisco que alimentan, en parte, a la presa Zimapán.

### **Lomeríos y Mesetas (L)**

Las mesetas y lomeríos se presentan bordeando a las formas de mayor elevación y se distribuyen al centro y occidente del área, porción correspondiente a la provincia del Eje Neovolcánico.

Las mesetas están conformadas principalmente por flujos de lava y material proveniente de la Caldera de Huichapan en donde las curvas de nivel delinean en planta formas elongadas de elevaciones menores a los 250 m de altura, con respecto al valle. El drenaje es de baja densidad, los patrones llegan a ser ligeramente dendríticos a paralelos y tienen una dirección de flujo hacia el NNW.

Por su parte, los lomeríos conforman pequeños aparatos volcánicos de composición basáltico-andesítica que presentan elevaciones hasta de 2,750 msnm. El patrón de drenaje que se desarrolla en estas estructuras es radial o dendrítico.

### **Cerros (C)**

Este conjunto de elementos morfológicos se distribuyen hacia la porción sur y sureste del acuífero.

Estas geofomas se caracterizan por estar constituidas por materiales volcánicos que conforman porciones elevadas de perfiles abruptos, tal como el Cerro La Virgen, Las Cruces, Nopala y los Cerros que delimitan a la Caldera de Huichapan. En esta última, los procesos de intemperismo y erosión han generado cañadas angostas y profundas, características de un estado de juventud geomorfológica.

El patrón de drenaje desarrollado en este conjunto morfológico es de tipo radial principalmente, excepto donde se ha colapsado la caldera, donde se ve un patrón dendrítico. Las cotas más elevadas en este conjunto morfológico alcanzan 3,100 msnm, aunque las alturas promedio son de 2,700 msnm; los desniveles con respecto al valle son muy notorios, llegando a ser de más de 1,000 m.

## **4 GEOLOGÍA**

El marco geológico dentro del cual se encuentra el Acuífero Huichapan-Tecozautla corresponde con una zona que ha desarrollado varios procesos geológicos de grandes magnitudes. Por su parte, las rocas cretácicas son el resultado de los procesos de sedimentación marina en plataformas (Formación El Doctor) y cuencas (Formaciones Tamaulipas Superior y Soyatal) y que, debido a la Orogenia Laramide, ahora conforman grandes estructuras plegadas.

Por otra parte, el vulcanismo terciario asociado con el Cinturón Volcánico Mexicano se inicia en el Mioceno Superior y se continúa hasta nuestros días; este episodio generó una importante

serie de edificios volcánicos, ubicados en el sector central y sur del área. Estos edificios volcánicos tienden a seguir patrones de fallas regionales con tendencias ENE-WSW, las cuales se considera que representan una zona de debilidad cortical. Los productos de esta actividad volcánica desarrollaron espesores considerables y se encuentran cubriendo parcialmente a la secuencia sedimentaria.

#### **4.1 ESTRATIGRAFÍA**

A partir de la información compilada, verificación geológica y de recorridos de campo, para identificar y verificar las unidades litoestratigráficas y las condiciones geológicas con un enfoque detallado hacia la geología estructural y la geohidrología, se determina que en esta región el movimiento del agua subterránea, está regido en forma por demás caprichosa a través de los conductos formados por las familias de fracturas asociadas a las zonas de falla.

Se confirmó la existencia de la columna litoestratigráfica compilada para el área, la cual, de acuerdo a las características litológicas superficiales observadas, está representada principalmente dos dominios contrastantes de rocas, unas asociadas a procesos sedimentarios y otras generadas por procesos volcánicos, extrusivos y piroclásticos, (Figura No. 4).

Las unidades litoestratigráficas cartografiadas, se describirán a continuación, de la más antigua a la más joven, mismas que se pueden ver en la figura No.4, así como las secciones geológicas en la figura No. 5.

##### ***Calizas y lutitas (Km-s)***

Unidad constituida por una secuencia de calizas dispuestas en estratos delgados y medianos, que alternan con intercalaciones de calizas arcillosas y lutitas en estratos delgados a laminares; esta unidad, por sus características arcillosas y por su posición estructural errática, no constituye en esta región un buen acuífero. Estas rocas tienen una permeabilidad baja a nula, y una limitada capacidad de almacenar agua; sin embargo, localmente pueden existir áreas en donde la permeabilidad secundaria causada por fracturamiento forme acuíferos de modestas productividades, que pudieran satisfacer o complementar el abastecimiento a pequeñas comunidades.

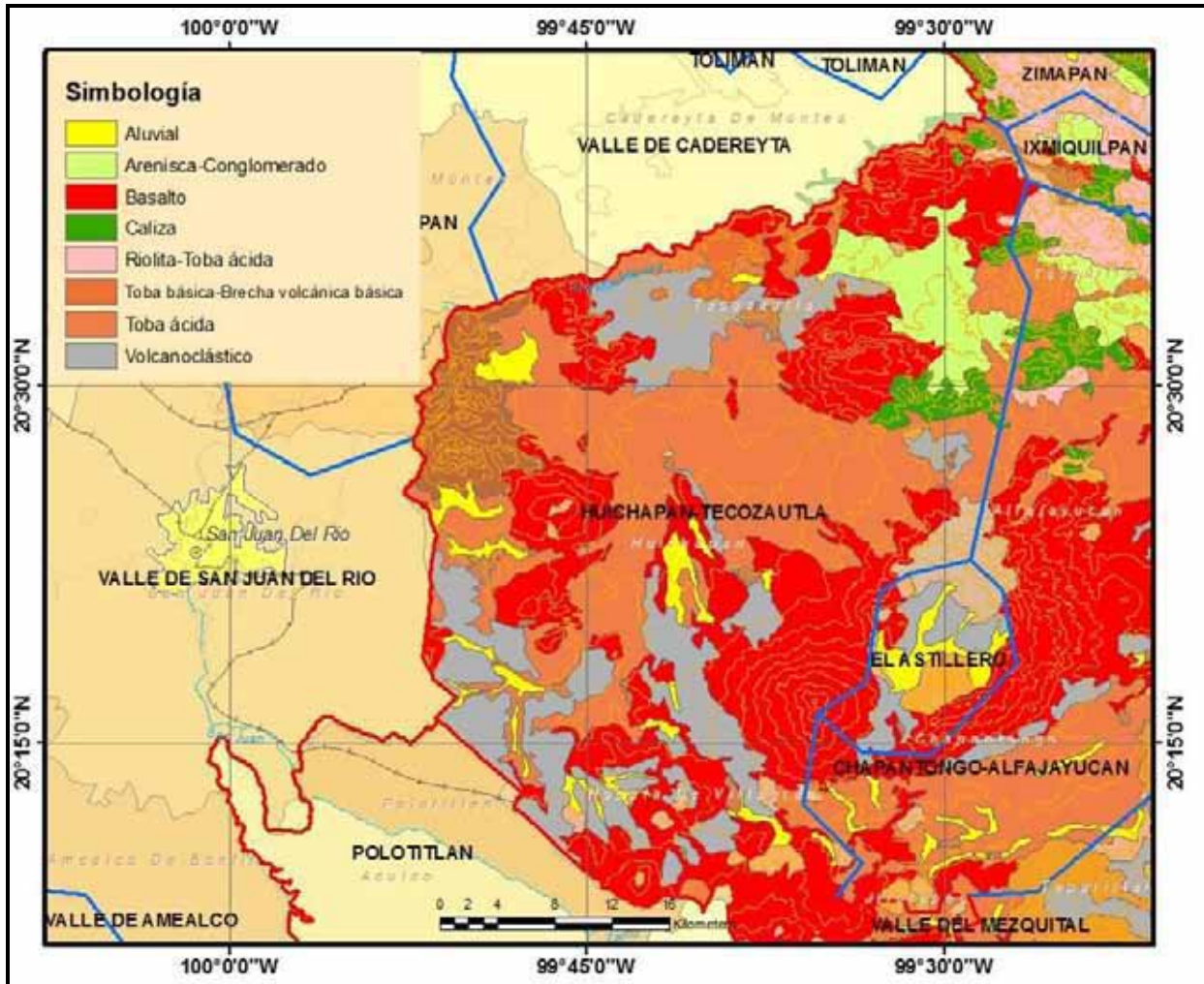


Figura No. 4. Geología de la zona Huichapan-Tecozaulta

### ***Andesitas (Tma) (Tma-b) (Tab)***

En esta unidad se han agrupado a todos los afloramientos que comprenden una serie de andesitas compactas y vesiculares (Tma); andesitas basálticas, vesiculares y compactas (Tmab); andesitas, andesitas basálticas y traquiandesitas, compactas y fracturadas (Tab). En todos los paquetes de rocas es común encontrar intercalaciones de aglomerados y brechas volcánicas de la misma composición; toda esta secuencia volcánica manifiesta un intenso fracturamiento, que les confiere un buen grado de permeabilidad. Las familias de fracturas observadas en campo tienen direcciones preferenciales Norte-Sur, Este-Oeste, NW-SE y NE-SW, que son los sistemas por donde fluye en cantidades importantes el agua en el subsuelo de la región. Dependiendo del grado de fracturamiento, constituyen las rocas que conforman el acuífero regional. Se puede decir que la base de esta secuencia está compuesta por riolitas y tobas riolíticas fracturadas.

### ***Tobas Donguinyó (Tmdg), tobas Huichapan (Tmh) y tobas Lacustres (Tps)***

En este paquete de rocas se han incluido a las rocas piroclásticas que diversos autores han denominado como tobas San Francisco, tobas Huichapan, tobas Donguinyó y tobas lacustres. Esta secuencia está conformada por un paquete de tobas líticas compactas en estratos gruesos,

tobas líticas con fragmentos negros de vidrio y de andesitas, tobas soldadas con fragmentos de pómez y de tobas arenosas deleznable, y flujos de cenizas volcánicas. Las tobas lacustres (Tpss), están constituidas por una secuencia de rocas piroclásticas y vulcanoclásticas depositadas al interior de la caldera de Huichapan.

#### ***Domos de lava (Tdr) (Tda)***

Según las determinaciones petrográficas de campo, corresponden en general a ignimbritas y piroclásticos de composición andesítica; esta secuencia se encuentra fracturada formando familias con direcciones Norte-Sur, NE-SW, NW-SE y Este-Oeste, las cuales le dan a los paquetes de ignimbritas una apariencia de bloques columnares.

Por su alto contenido arcilloso dentro de los paquetes de tobas, no constituye un buen acuífero. Sin embargo, la toba Donguinyó (Tmdg) compuesta por tobas e ignimbritas, tiene permeabilidad secundaria por fracturamiento a profundidad, característica que se comprueba por la presencia de manantiales termales en la zona de Pathecito. Los caudales que se obtienen en pozos son de 20 a 35 l/s.

#### ***Tobas lacustres (Tpss)***

Están constituidas por una secuencia de rocas piroclásticas y vulcanoclásticas depositadas al interior de la caldera de Huichapan.

#### ***Domos de lava (Tdr) (Tda)***

Con esta nomenclatura se ha denominado a una serie de domos extrusivos, que afloran en el borde interno NW y meridional de la denominada Caldera El Astillero o de Huichapan, a los cuales se les ha denominado según el nombre del rasgo topográfico asignado en las cartas de INEGI.

Así, el Cerro La Gerja (Tdr), está constituido por una secuencia volcánica extrusiva de composición riolítica, compacta a ligeramente fracturada, con baja a nula permeabilidad, por lo que no constituye un acuífero. El domo de Hualtepec (Tda) está conformado por una lava andesítica con textura porfídica, compacta a ligeramente fracturada, y con baja a nula permeabilidad, por lo que no constituye un acuífero. El domo Santa Lucía (Tda), está constituido por una andesita vesicular a compacta, ligeramente fracturada, con baja a nula permeabilidad, por lo que tampoco constituye un acuífero, y el domo Dañé (Tda), conformado por una andesita basáltica, vesicular a compacta, ligeramente fracturada, con baja a nula permeabilidad, que no conforma un acuífero.

#### ***Basaltos (Tb) (Qb) (Ta) (Tar)***

Con esta nomenclatura se ha designado a toda la serie de derrames lávicos, de composición basáltica (Tb) (Qb), andesítica (Ta) y algunas andesitas y riolitas (Tar), que conforman los afloramientos de la porción sur y oriente de la ciudad de Huichapan, siendo el más espectacular y representativo el volcán Nopala (Tb), así como aquellos que se encuentran en la porción norte y NW de la ciudad de Tecozautla y que conforman la zona geotérmica del Pathé.

Esta serie de derrames de basalto presentan, desde el punto de vista hidrogeológico, características de ser buenos receptáculos de agua, ya que entre los derrames de lava se observan intercalaciones de brechas escoriáceas, tezontle, lapilli, asociados a brechas y aglomerados volcánicos que les confieren buena porosidad y permeabilidad. Aunado a lo anterior, se observa cierto fracturamiento que favorece aún más la infiltración del agua de lluvia, hacia rocas más profundas del subsuelo, por lo que funcionan como zonas de recarga.

### ***Depósitos aluviales (Qal)***

En esta unidad quedan agrupados los depósitos de pie de monte, suelos residuales y abanicos aluviales, constituidos por fragmentos del tamaño de cantos rodados a gravas, que varían de angulares a subredondeados y que han sido depositados en las faldas de las porciones elevadas, en los cauces de los arroyos, en las partes bajas y planas de los valles de Tecozautla, Huichapan, Llano Largo, San Francisco, Bomaxotha, Jonacapa y La Manga-El Llano, los cuales provienen de las partes topográficas más elevadas.

Los fragmentos provienen de la erosión de las rocas volcánicas situadas en las partes más elevadas de las sierras aledañas, las cuales son depositadas en las laderas, en el lecho de los arroyos y en las partes topográficamente bajas.

Estos depósitos tienen buena permeabilidad, pues al no estar consolidados y tener intersticios que se comunican entre sí, constituyen un acuífero libre superficial, que en ocasiones llega a tener cierta importancia, ya que es capaz de abastecer de agua potable a poblados pequeños y rancherías. Al tener espesores relativamente pequeños y una capacidad relativamente baja de almacenamiento, su aprovechamiento se hace por medio de norias, de las cuales se extraen pequeños volúmenes de agua que se destinan primordialmente al uso doméstico-abrevadero.

## **4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

De forma regional, se pueden distinguir dos tendencias preferenciales de fallas y fracturas; una con una dirección ENE-WSW y otra NNW-SSE.

El sistema de fallas y fracturas con tendencia al NNW-SSE, se interpreta que es previo a la actividad del Eje Neovolcánico, ya que en algunas partes estas estructuras han sido cubiertas por los depósitos volcánicos. Sin embargo, cabe la posibilidad de que algunas de estas estructuras se hayan reactivado y se encuentren afectando a los aparatos volcánicos, como es el caso del colapso de la Caldera de Huichapan.

Las fallas y fracturas con dirección ENE-WSW se considera que están asociadas a la actividad tectónica del Eje Neovolcánico. Las porciones noroeste, oeste y este del acuífero se caracterizan por geoformas afines con un campo volcánico cuyo patrón de lineamientos ocurren en una dirección noreste-suroeste. Los aparatos volcánicos muestran su característica forma cónica y sus emplazamientos guardan una orientación similar con la tendencia de los lineamientos. Asimismo, se encuentran afectando al sistema NNW-SSE y a las rocas sedimentarias cretácicas expuestas al NE del área.

En el extremo noreste, sobre el cauce del Río San Juan, se presenta una falla inversa de rumbo N-S que permite observar sedimentos de la Formación Trancas sobre las calizas de la Formación El Doctor. Otra falla es marcada por el Río Pathecitos o Tecozautla que se bifurca, convergiendo una de sus ramas con la prolongación de la falla localizada al E-NE del poblado de Tecozautla y la otra orientada hacia el aparato volcánico El Astillero.

En el área del acuífero es importante también la presencia de dos aparatos volcánicos, El Astillero y el Cerro de Nopala.

### 4.3 GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

A partir de la distribución en campo de los sondeos eléctricos, se seleccionaron las secciones identificadas con números en sentido norte-sur y con letras en sentido este-oeste, aproximadamente. Los perfiles correspondientes pueden verse en las figuras Nos. 6 a 11.

Con los datos de la interpretación individual de cada uno de los SEV's se establecieron, de manera general, cinco unidades geofísicas correlacionadas con las formaciones geológicas, que de la superficie hacia abajo son: 1) Basaltos y basaltos andesíticos (Tb), 2) Materiales piroclásticos y tobas líticas (Tmh), 3) Andesitas y andesitas basálticas (Tma), 4) Riolitas y tobas riolíticas (Tmr) y 5) calizas y lutitas calcáreas (Km-s)

Con el objeto de visualizar el comportamiento de las rocas en el subsuelo, se interpretaron 5 secciones geológicas, 3 de ellas atraviesan el acuífero en una dirección E-W, mientras que las 2 restantes, en una dirección N-S.

En la sección 1-1' se puede ver un basamento sedimentario, constituido por rocas predominantemente calcáreas, depositadas en un ambiente marino. Las rocas que se consideran corresponden al Jurásico Superior se distribuyen en el extremo este de la sección, éstas no afloran dentro del área del acuífero, sin embargo se infiere su presencia en el subsuelo. Corresponden con lutitas calcáreas, con escasos horizontes de areniscas y productos volcánicos.

Esta unidad es sobreyacida por más de 700 m de calizas de plataforma (Fm. El Doctor), que desarrollaron un ligero plegamiento y que forman estructuras amplias. Aflora hacia el oriente de esta misma sección, en los cerros de Taxtho e Ixcojo, y se profundiza en la parte central por efecto de una falla normal. De la porción central hacia el extremo occidental de esta sección, se presentan una serie de fallas inversas y pliegues con convergencia al noreste en las calizas de cuenca de las formaciones Tamaulipas Superior y Soyatal (sección 1-1') y vistas en sección longitudinal, las capas, se ven ligeramente onduladas (sección 4-4'). Las primeras están constituidas por capas delgadas de calizas (mudstone) intercaladas con horizontes calcáreo-arcillosos, mientras que la Fm. Soyatal tiene una mayor componente arcillosa o terrígena y su distribución se restringe a los sinclinales.

La cubierta volcánica, por su parte, está expuesta en la mayor parte del área del acuífero y su distribución en el subsuelo se ve en las secciones 1-1', 2-2' y 3-3'. En la primera sección, el paquete volcánico es de menor espesor, ya que la secuencia calcárea no está muy profunda.

Las secciones 2-2' y 3-3' muestran un comportamiento muy similar en cuanto a estas unidades volcánicas. En la base se pueden ver las riolitas y andesitas, producto de la actividad ígnea del Oligoceno. Posteriormente se emplazan todos los materiales asociados con el Eje Neovolcánico. Estos productos compuestos por lavas y flujos piroclásticos tienen un mayor espesor en las inmediaciones de las fuentes de emisión y se van acuñaando a la vez que se alejan de éstos.

Hacia las porciones orientales de las secciones 2-2' y 3-3' y sur de la sección 5-5', se presentan los productos derivados de la Caldera de Huichapan que corresponden con lavas andesíticas, flujos piroclásticos de la misma composición así como riolitas y derrames de basaltos (Cerro Las Cruces), conformando un espesor, en conjunto, de más de 1,500 m (secciones 3-3' y 5-5'), los cuales se acuñaan hacia la parte central de estas secciones y son sobreyacidas por 800 m

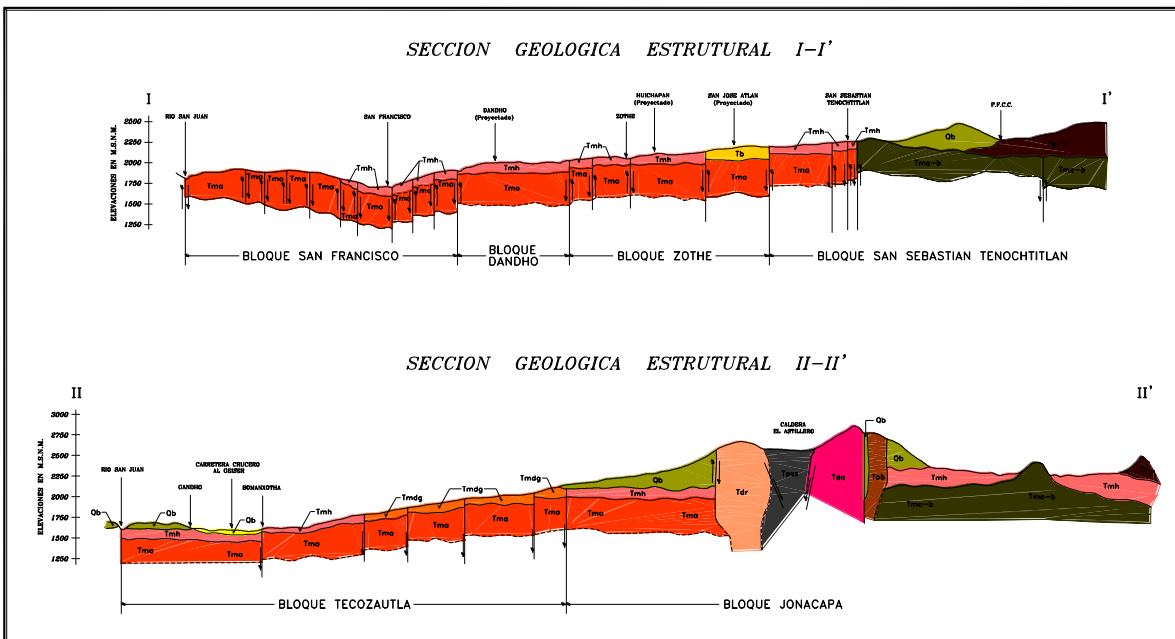


de lavas andesíticas en forma de domos y flujos piroclásticos emitidos por aparatos volcánicos localizados al occidente del área (secciones 1-1', 2-2' y 3-3').

Todos estos depósitos volcánicos son cubiertos parcialmente por derrames de lavas basálticas del Plioceno (cerros El Patón, El Tenyoy) y del Cuaternario, ya sea por los flujos piroclásticos de las Tobas Don Guinyó hacia la parte central de las secciones, o por la Toba Huichapan, hacia el extremo occidental de estas secciones. Los espesores de estas unidades varían entre 100 y 300 m. Estos cuerpos volcánicos han sido afectados por pequeñas fallas normales como se ve en la sección 2-2'. En la sección 1-1' los materiales de la Toba Don Guinyó descansan directamente sobre las rocas calcáreas cretácicas rellenando pequeñas depresiones.

La prospección descrita anteriormente es la base de las secciones geológicas que se presentan en la figura No. 5, coincidiendo las unidades con los pozos de mayor productividad ya perforados en la zona.

**Figura No. 5. Secciones geológicas**





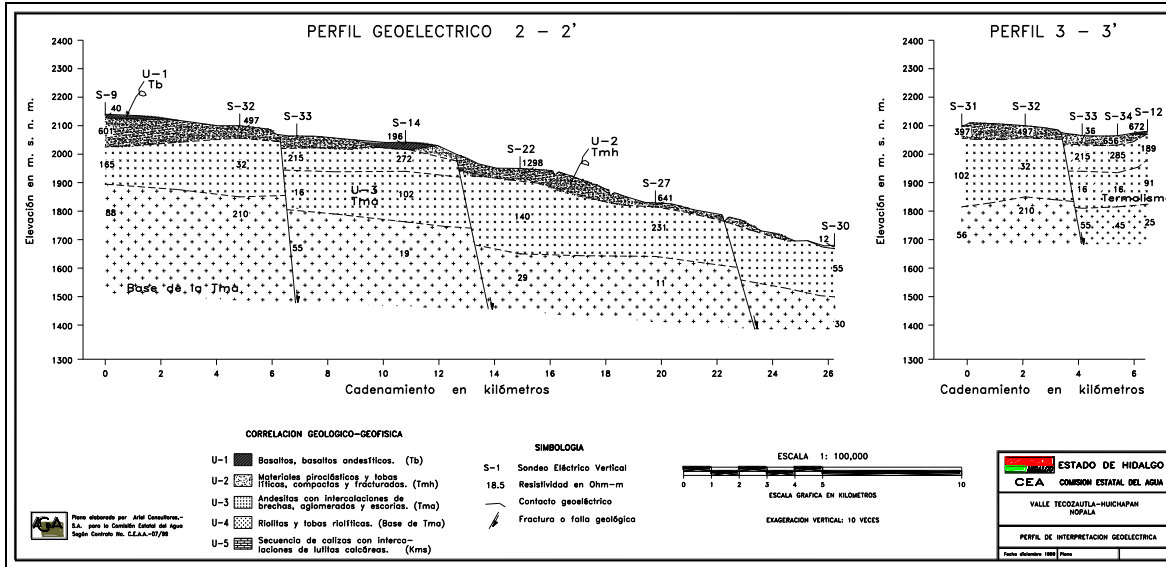


Figura No. 6. Perfil 1-1'

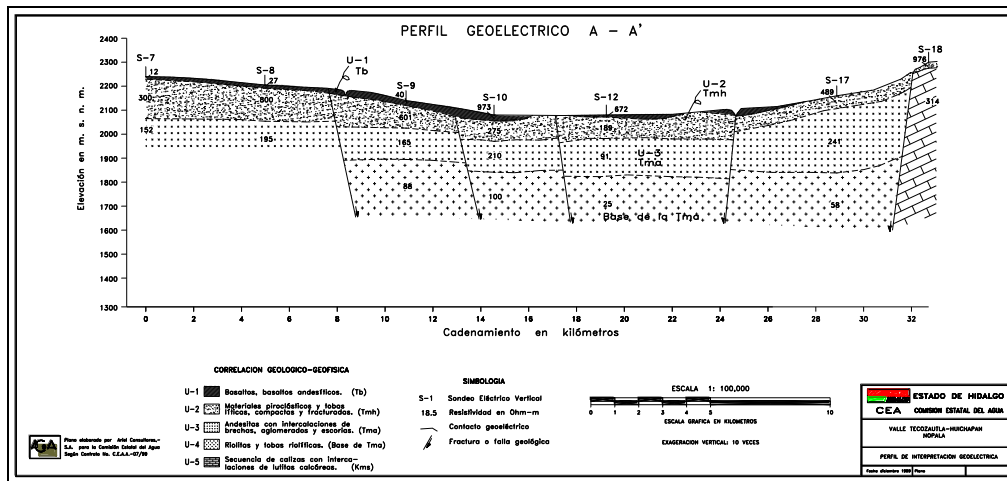


Figura No. 7. Perfil 2-2'

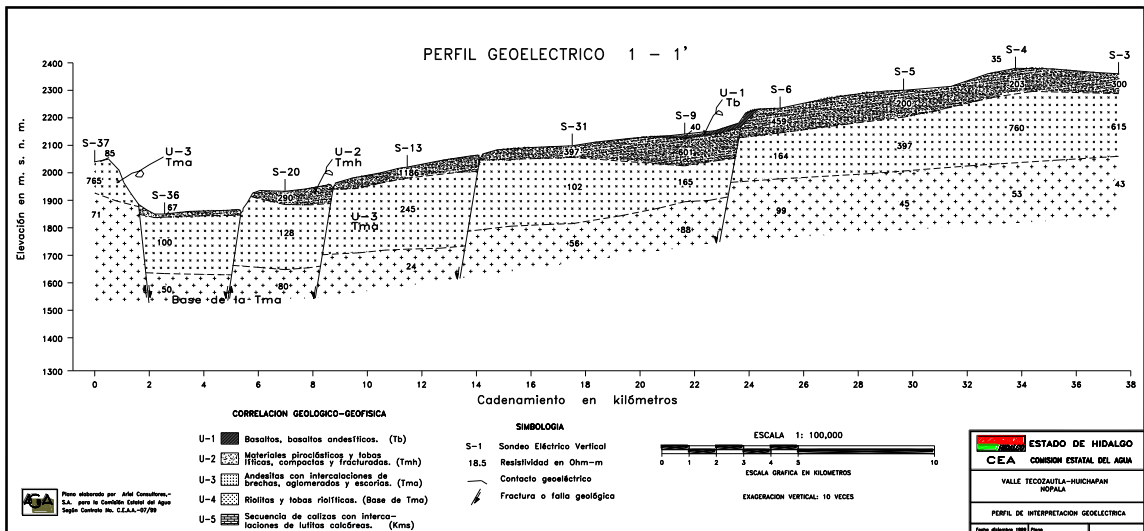


Figura No. 8. Perfil A-A'

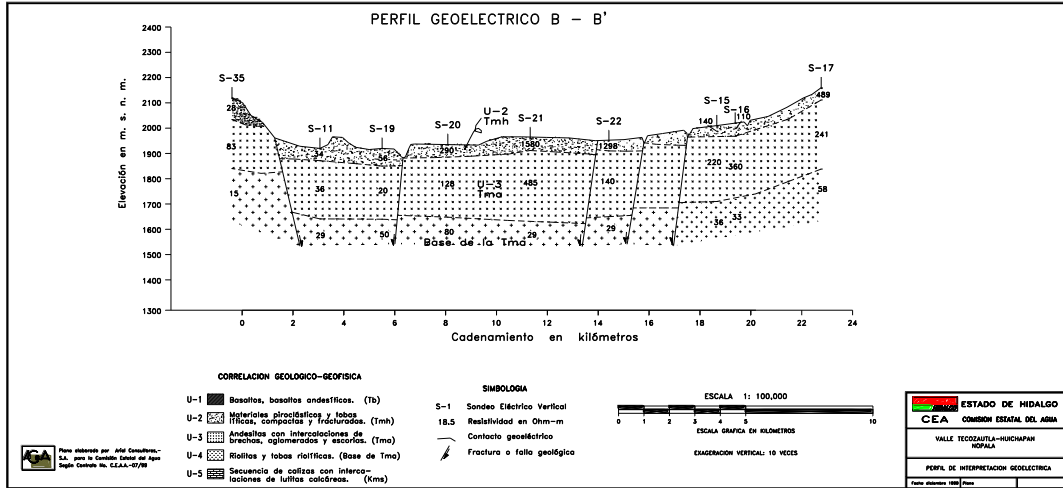


Figura No. 9. Perfil B-B'

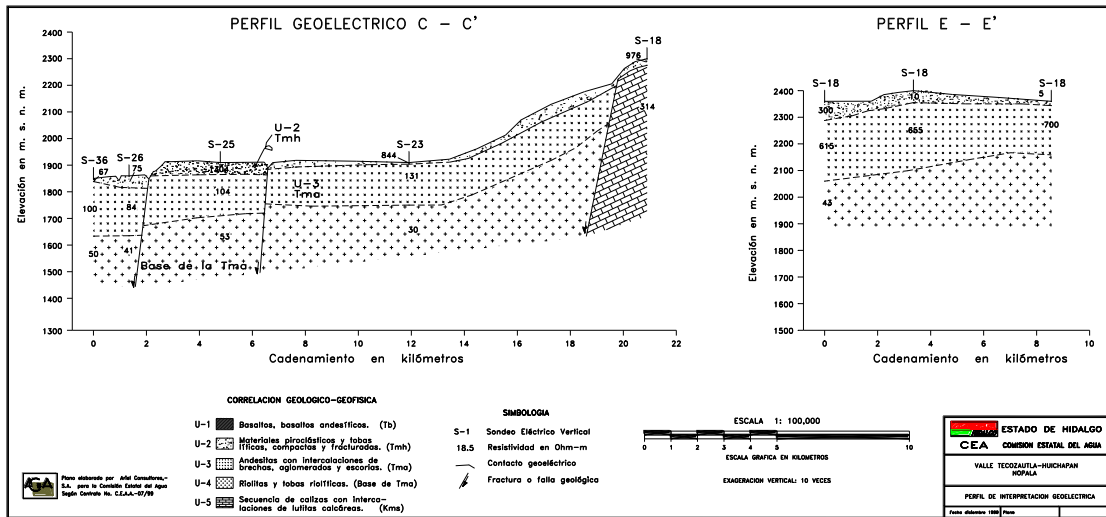


Figura No. 10 Perfil C-C' y E-E'

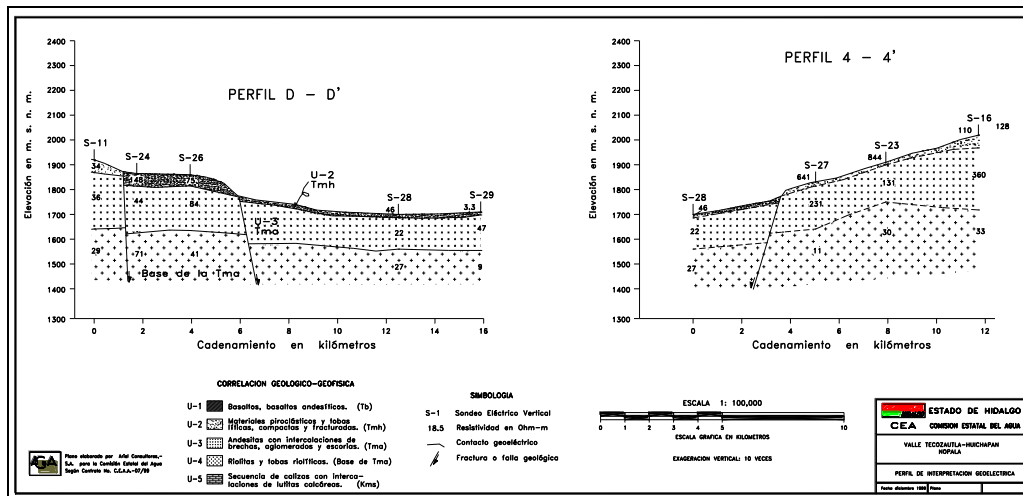


Figura No. 11. Perfil D-D' y 4-4'

## **5 HIDROGEOLOGÍA**

Los materiales componentes del principal acuífero de la región están constituidos litológicamente por andesitas, andesitas basálticas, aglomerados y brechas de composición andesítica y basáltica, los cuales en superficie presentan un fuerte fracturamiento, en el subsuelo los paquetes de rocas volcánicas granulares presentan fracturamiento.

La posición estratigráfica de las formaciones geológicas aflorantes y del subsuelo, así como su relación estructural, junto con las características antes citadas, son los factores que norman el comportamiento del principal acuífero de la región.

Por otro lado, la recarga al acuífero proviene de la infiltración del agua de lluvia, la cual se precipita tanto en las partes altas de las sierras, como en los lomeríos y valles de la región, infiltrándose en el subsuelo hasta alcanzar las rocas volcánicas que constituyen el acuífero, a través y por medio de los sistemas de fracturamiento. Otra parte escurre en los depósitos de pie de monte o en las rocas compactas, y se desplaza a través de los arroyos intermitentes; esta infiltración está influenciada y controlada por los escurrimientos superficiales, que se forman durante la época de lluvias y que al encontrar formaciones permeables, penetran en ellas y complementan la recarga.

El comportamiento del agua subterránea está determinado por el marco geológico, el cual está regido principalmente por tres factores: el estratigráfico; el geomorfológico y el tectónico-estructural.

El factor tectónico estructural juega un papel relevante, ya que la intensidad y dirección con que actuaron los esfuerzos, así como la disposición del fracturamiento y la homogeneidad y la continuidad estructural, son los aspectos más importantes para analizar y poder definir el marco geohidrológico conceptual de la región. El fracturamiento que sufrieron las unidades incrementó su permeabilidad; la continuidad de las estructuras, tanto longitudinal como transversalmente, conjugado con los factores estratigráfico y geomorfológico, permiten definir los sistemas hidrológicos de una zona.

El flujo principal adopta una dirección de sur a norte, pero además se ve alimentado lateralmente por las infiltraciones provenientes de las estribaciones de las sierras que limitan al valle, tanto por el oriente como por el poniente. Finalmente se concentra en la zona de Tecozautla y Gandhó, donde las condiciones en el subsuelo son favorables, al grado de ser el área que contiene el mayor número de pozos y donde se concentra la extracción, ocasionando la intercepción del flujo hacia el Río San Juan y la aparición de un cono de abatimiento local.

### **5.1 TIPO DE ACUÍFERO**

El acuífero Huichapan-Tecozautla de puede considerar de tipo libre a semiconfinado.

### **5.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS**

De la información de pruebas de bombeo realizadas en estudio previos, se deduce que el valor de la transmisividad varía de 0.2 a  $94.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (tabla No. 4). Sin embargo los valores obtenidos representan características locales del acuífero, debido a que las formaciones que lo conforman son de origen volcánico y sus propiedades hidráulicas son producto de fracturas y fisuras propias del sitio de ejecución de la prueba. Se considera que el valor promedio es de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , eliminado los dos valores muy altos. Sin embargo, las pruebas realizadas en 1988

en la planicie en las inmediaciones de Tecozautla, arrojan un promedio de  $0.89 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . No se disponen de datos de coeficientes de almacenamiento.

**Tabla No. 4. Valores de transmisividad en el acuífero Huichapan-Tecozautla**

POZO	PROFUNDIDAD		Caudal l/s	Caudal específico Qe (l/s)	ABATIMIENTO		RECUPERACIÓN		Fecha
	Nivel Estático (m)	Nivel dinámico (m)			Duración minutos	T $\text{m}^2/\text{s}$ $10^{-3}$	Duración minutos	T $\text{m}^2/\text{s}$ $10^{-3}$	
A5	74.77	102.52	31	1.12	330	0.834			1988*
A5	74.91	102.52	31	1.12			60	1.070	1988*
A2	61.05	65.00	5.5	1.39	60	0.524			1988*
A2	61.07	65.00	5.5	1.40			40	4.026	1988*
A1	57.15	69.80	17	1.34			120	3.456	1988*
A1	56.00	69.80	17	1.23	60	1.307			1988*
<b>Promedio</b>						<b>0.89</b>		<b>2.85</b>	
14	88.70	125.35	26.0	0.71	600	0.69	180	0.28	1999**
20	104.77	107.98	54.7	17.04	420	8.07	420	5.01	1999**
39	72.83	79.26	52.0	8.08	300	15.80	120	6.14	1999**
43	92.00	97.80	33.5	5.78	300		150	7.66	1999**
76	88.70	92.57	60.0	15.50	420	5.37	240	0.48	1999**
88	46.33	46.65	65.0	203.12	300		180	6.99	1999**
93	108.18	113.31	50.0	9.75	300		60	45.70	1999**
96	84.35	92.10	33.7	4.35	720	6.16	120	19.70	1999**
97	80.42	80.66	15.4	64.17	420	94.0	180	1.28	1999**
110 rep	59.52	71.85	28.6	2.32	720	1.90	480	2.32	1999**
111 obs	60.46	70.70	18.0	1.76	15	0.70	90	5.49	1999**
111	59.49	64.25	28.6	6.01	720	2.82	480	2.27	1999**
116	83.45	115.26	20.0	0.63			420	0.23	1999**
128	124.15	152.07	14.0	0.50	720	0.24	480	0.18	1999**

### 5.3 PIEZOMETRÍA

Se cuenta con información piezométrica para el periodo 1978-2006 sin embargo, esta no es consistente en el tiempo; sólo se tiene para los años 1978, 1996, 1999 y 2006.

### 5.4 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

#### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

En cuanto a las configuraciones de la profundidad al nivel estático para 1978 y 1996 se aprecia que los valores en el área de Nopala eran del orden de 200 m, mientras que hacia Huichapan variaban entre 100 y 150 m, y en Tecozautla de entre 50 a 100 m.

La configuración de la profundidad al nivel estático para el año 1999 se presenta en la figura No. 12 y en ella se observa que los niveles son variables, correspondiendo valores del orden de 230 m en las cercanías del poblado de Francisco I. Madero, descendiendo al norte del poblado de Huichapan, donde las profundidades son de aproximadamente 110 m. En las inmediaciones del poblado de Gandhó las profundidades son de hasta 40 m, aumentado hacia sus alrededores.

Estos valores se han incrementado en los últimos años, sobre todo en la zona de Tecozautla y Huichapan, hasta 80 y 100 m en la primera de las zonas mencionadas y a más de 100 m en los alrededores de Huichapan.

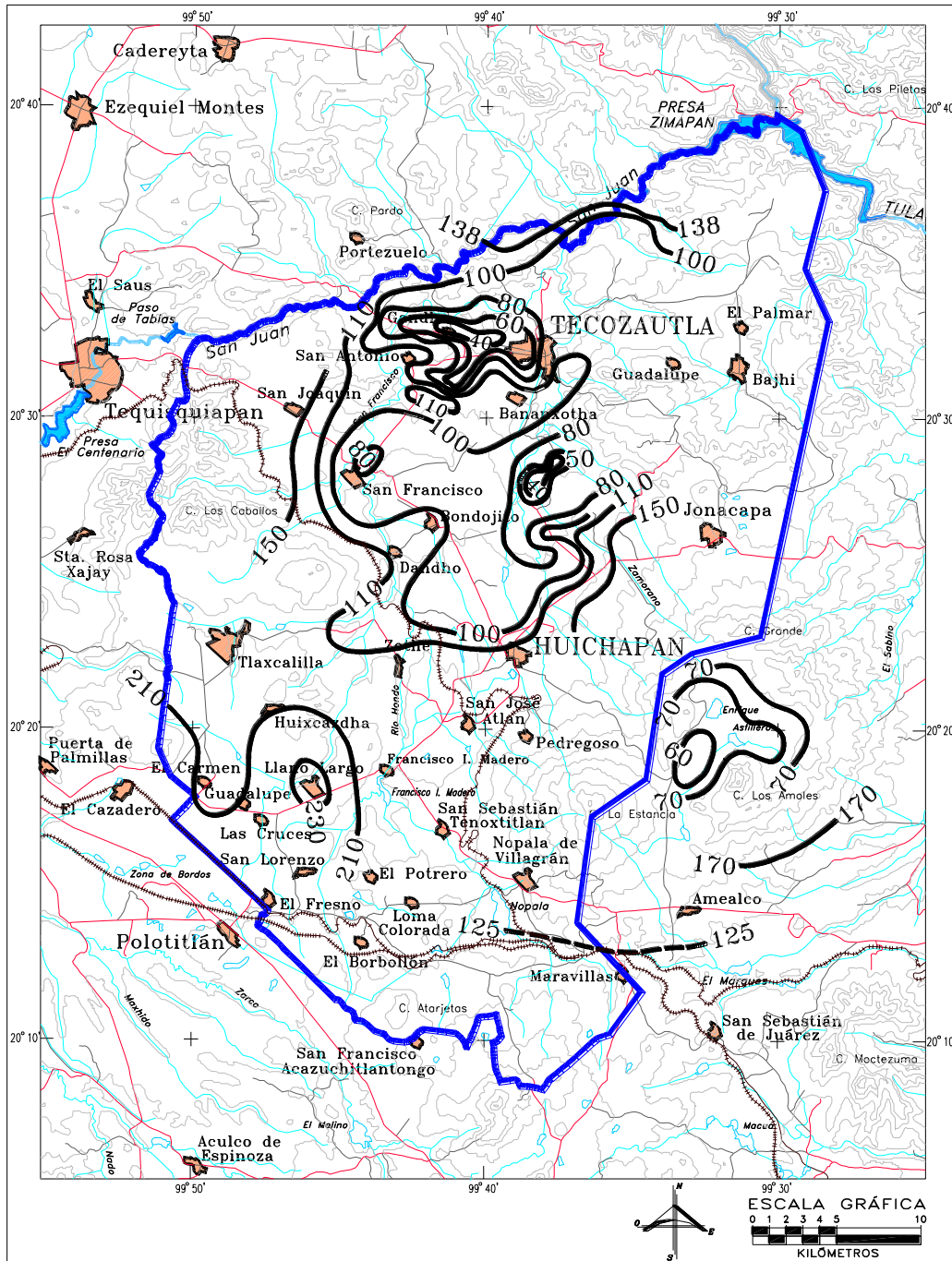


Figura No. 12. Profundidad al nivel estático en m (1999)

Para el 2006 los valores de profundidad al nivel estático oscilan entre los 220 y 60 m, con los valores más altos localizados en el extremo suroccidental del acuífero y los más bajos en su límite norte, hacia el cauce del Río San Juan. Respecto de la configuración de 1999, se observa que la zona con profundidad de 80 m se extiende al oriente de Tecozautla y aparece un cono de abatimiento hacia el oriente de San Francisco (figura No. 13).



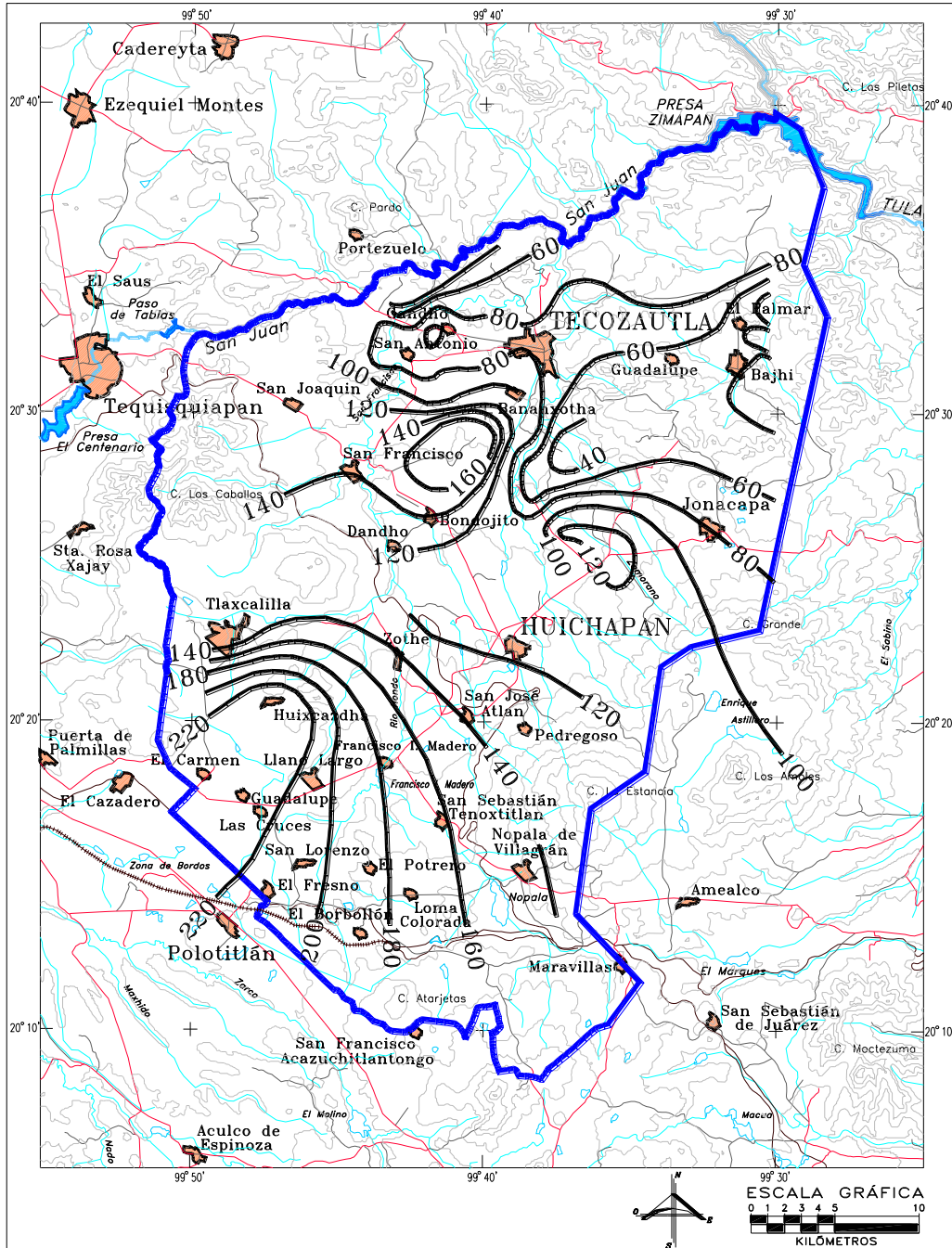


Figura No. 13. Profundidad al nivel estático en m (2006)

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

De acuerdo con la información disponible para el año de 1978, sólo se tenían datos de las elevaciones de nivel estático en dos pequeñas áreas, debido a la carencia de pozos con nivelación de brocales. La primera se localiza al norte del poblado Huichapan donde la elevación se ubica en los 1950 msnm, descendiendo hacia el noroeste hasta valores de 1860 msnm, y la segunda área se localiza al oeste de Tecoautla, donde los valores oscilan de 1680 a 1650 msnm con dirección hacia el norte.

La configuración del año 1996 abarca un área mayor ya que considera las elevaciones del terreno a partir de cartas de INEGI. Aunque no es muy representativa, da una idea del esquema general del flujo subterráneo, donde se observa que el flujo subterráneo regional adopta una dirección preferencial de sur a norte, desde las estribaciones del cerro de Nopala hasta el cauce del río San Juan, pasando por Huichapan, Pathecitos y Tecozautla, flujo señalado por la equipotencial con valor de 2200 msnm, en su origen, hasta los 1600 msnm, en la zona localizada entre Tecozautla y el río San Juan.

De acuerdo con la configuración realizada con información del año 1999, figura No. 14, se aprecia que las mayores altitudes del nivel estático se localizan al sur de Huichapan así como en las cercanías de Nopala de Villagrán; en general, se puede decir que de Huichapan hacia el norte las elevaciones decrecen de tal forma que el flujo subterráneo es de sur a norte hasta alcanzar valores de 1600, al norte del poblado de Tecozautla.

En la figura No.15 se muestra la elevación de los niveles estáticos para el año del 2006, indicando un flujo regional de sur a norte, que reconoce la parte más baja de la cuenca, o sea hacia el río San Juan. Se muestran, además las direcciones de flujo y los canales para el cálculo de las entradas y salidas por flujo subterráneo.

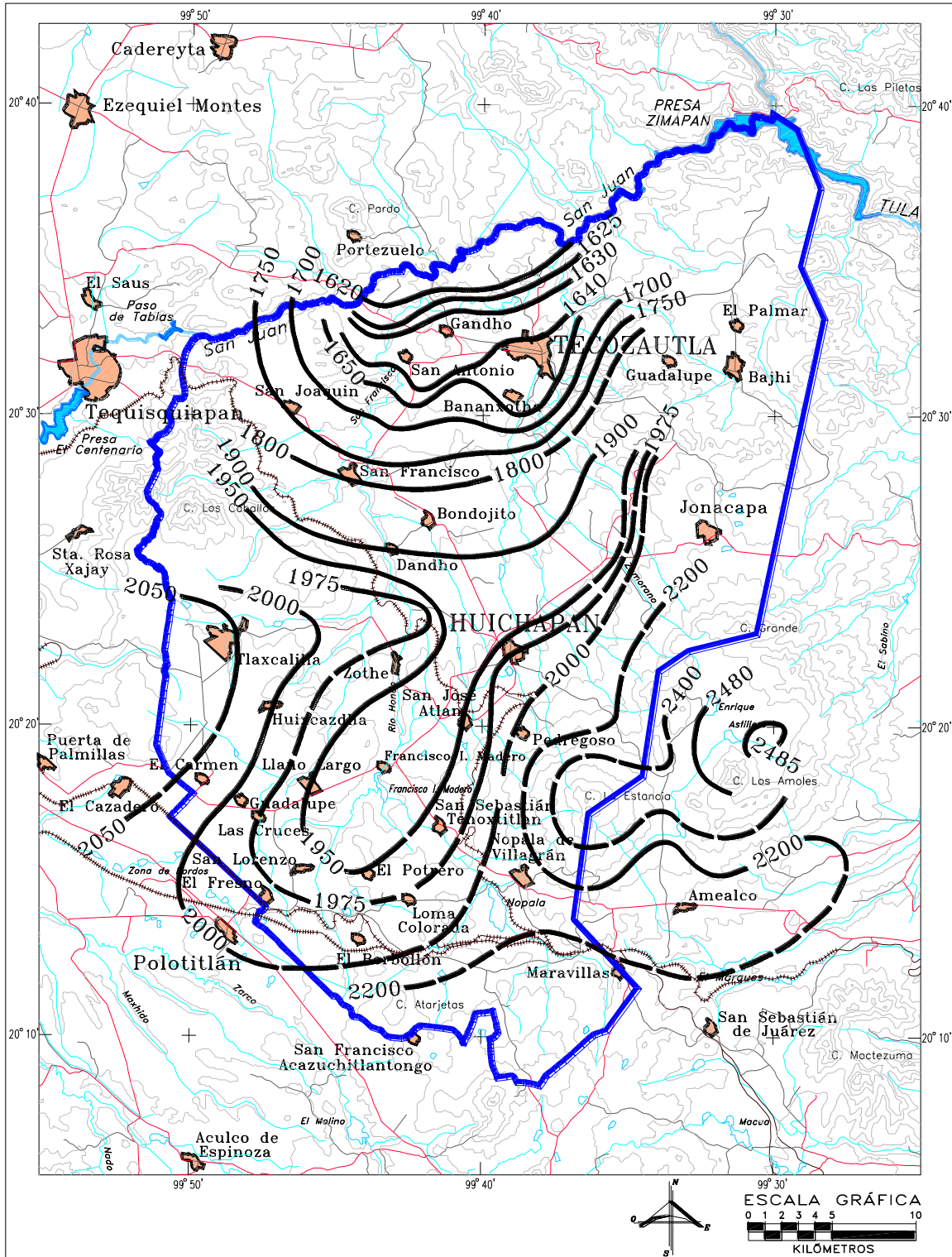


Figura No. 14. Elevación del nivel estático en msnm. (1999)



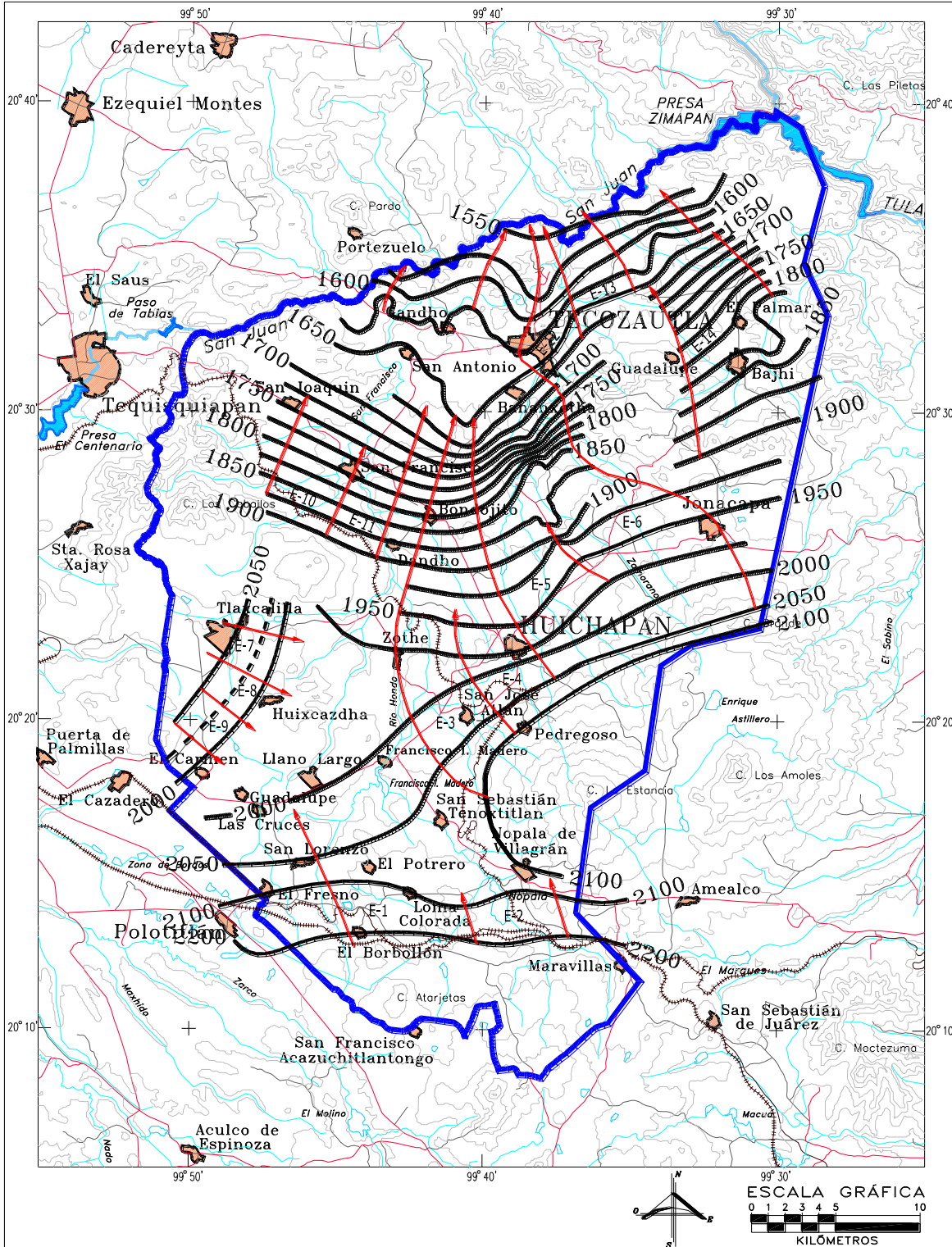


Figura No. 15. Elevación del nivel estático en msnm. (2006)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático (1999-2006)

Comparando las configuraciones de igual elevación para el año 1978 con las del año 1999, se observa que en el área del poblado Tecozautla los niveles del agua subterránea han descendido debido al régimen intensivo de extracción que ha ocasionado una condición de sobreexplotación.

Los resultados del estudio del 2006, corroboran esta situación al observar la figura No. 16, que muestra la evolución del nivel estático entre los años de 1999 y 2006, en donde los descensos mayores se ubican en la zona de Tecozautla, Huichapan y Taghí-Caltepanitla.

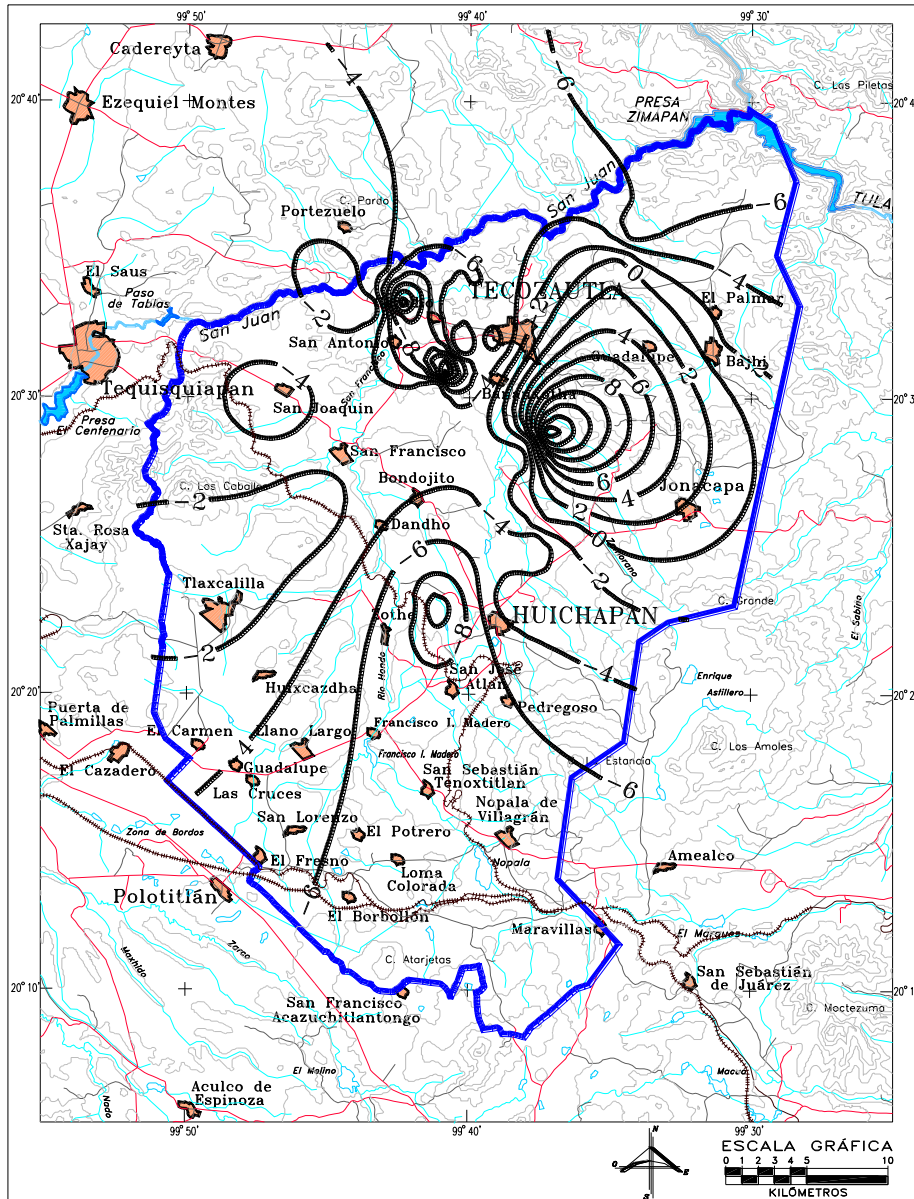


Figura No. 16. Evolución del nivel estático en m. (1999-2006)

## 5.5 HIDROGEOQUÍMICA Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Con base en resultados de análisis físico-químicos practicados a 12 muestras de agua colectadas durante el estudio de 1988, se elaboró la tabla No. 5. Se presenta en ese mismo trabajo la relación de absorción de sodio para clasificar las aguas desde un punto de vista agronómico, resultando apta para riego. No se abunda más al respecto, pues cumplen con las normas de calidad para el agua potable, con mayor razón para fines agrícolas. También se realizaron determinaciones especiales en tres muestras (metales pesados, manganeso, sílice, fluor, boro y arsénico), pero que no fueron detectados y por ello ya no fue necesario efectuar más determinaciones.

**Tabla No. 5. Resultados de análisis físicoquímicos (1988)**

Pozo	pH	C.E.	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Alcalinidad mg/l	STD mg/l	Detergentes mg/l
T1	6.5	223	56.0	6.76	14.11	2.86	173.7	4.53	19.96	142.4	246	0
T2	6.5	216	55.0	6.17	12.54	3.81	182.4	4.53	1.96	149.5	256	0
T3	7.0	229	57.0	6.49	10.98	3.80	172.7	5.44	3.98	142.4	280	0
T4	7.0	227	46.5	2.26	12.54	2.85	130.2	3.62	5.00	106.8	212	0
T5	7.0	229	33.3	9.00	10.98	2.85	173.7	5.44	0.00	142.4	632	0
T6	7.0	221	55.0	7.00	11.76	4.76	173.7	3.62	19.96	142.4	226	0
T7	7.0	210	46.8	6.76	11.76	4.76	156.3	4.53	0.76	128.1	220	0
T8	7.0	222	58.0	7.98	17.25	2.86	191.1	4.53	8.97	156.6	228	0
T10	6.5	227	55.0	9.00	14.11	1.90	173.7	3.62	8.97	142.4	262	0
T12	6.5	219	55.0	6.76	12.54	3.81	191.1	4.53	8.97	156.6	244	0
T14	7.5	227	57.0	7.98	12.54	3.81	173.7	5.44	15.45	142.4	638	0
T15	7.0	238	55.0	6.76	12.54	3.81	173.7	3.62	8.97	142.4	246	0

En el trabajo de 1999 se muestrearon 50 sitios, de los cuales fueron seleccionadas 28 para sujetarlas a determinaciones físico químicas de laboratorio, básicamente con el propósito de corroborar las condiciones reportadas en estudios previos y ampliar estos conocimientos (tabla No. 6). En los pozos en operación se determinaron las propiedades físicas de temperatura, pH y conductividad eléctrica. Se elaboraron configuraciones de concentración de iones como bicarbonatos, sulfatos, calcio+magnesio, cloruros y sólidos totales disueltos, cuya interpretación manifiesta prácticamente el mismo esquema en cuanto a las direcciones que adopta el flujo subterráneo. En primer lugar, se define claramente una zona de recarga para los acuíferos de las planicies, desde las faldas de El Astillero mediante las curvas de concentración mínima, y que en el caso del Ca+Mg, marca sus efectos hasta Huichapan.

**Tabla No. 6. Resultados físico químicos de laboratorio, 1999.**

No.	PH	Alcalinidad total mg/l	Dureza total mg/l	Sol Totales disueltos mg/l	CO <sub>2</sub> mg/l	CO <sub>3</sub> mg/l	HCO <sub>3</sub> mg/l	Cl mg/l	SO <sub>4</sub> mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	Fe mg/l	Mg mg/l
M-4	8.26	66.5	162.4	132	2.6	0.0	81.1	21.7	5.2	26.9	23.0	23.0	5.0	0.0	0.0
M-5	7.82	165.9	245.5	328	4.3	0.0	202.4	45.7	26.0	50.6	28.8	24.1	18.8	0.0	0.0
M-11	7.74	215.0	352.4	377	4.3	0.0	262.2	46.9	27.3	82.2	35.5	32.9	22.4	0.0	0.0
M-12	7.83	84.8	202.0	200	2.6	0.0	103.5	32.0	31.2	42.7	23.0	21.8	9.8	0.0	0.0
P-7	7.93	156.5	162.4	204	3.4	0.0	190.9	18.3	5.2	31.6	20.2	23.7	11.0	0.0	0.0
P-19	7.93	130.1	142.6	165	3.4	0.0	158.7	20.5	8.4	25.3	19.2	23.3	7.9	0.0	0.0
P-20	7.99	139.6	146.5	209	3.4	0.0	170.2	25.1	6.5	30.0	17.3	20.8	10.7	0.0	0.0
P-21	7.81	170.0	182.2	247	2.6	0.0	207.0	25.1	10.4	33.2	24.0	23.9	10.1	0.0	0.0
P-26	7.79	198.0	190.0	318	3.4	0.0	241.5	33.1	23.4	41.0	21.1	35.7	11.4	0.0	0.0
P-27	7.81	196.1	186.2	295	4.7	0.0	239.2	28.6	20.8	36.3	23.0	34.4	10.3	0.0	0.0
P-31	7.95	149.0	194.2	253	3.7	0.0	181.7	27.4	15.6	41.0	22.1	30.6	9.1	0.0	0.0

P-32	7.88	205.5	202.0	308	2.9	0.0	250.7	28.6	11.7	41.0	24.0	33.8	11.9	0.0	0.0
P-33	7.73	288.5	249.5	400	4.4	0.0	351.9	37.7	19.5	58.5	24.9	36.1	12.4	0.0	0.0
P-34	7.82	275.3	198.0	350	5.1	0.0	335.8	24.0	2.0	44.2	21.1	35.0	18.5	0.0	0.0
P-36	7.95	181.1	122.8	233	3.7	0.0	220.8	25.1	3.9	31.6	10.5	24.2	9.7	0.0	0.0
P-39	7.90	152.8	198.0	208	4.4	0.0	186.3	27.4	1.3	30.0	29.8	34.9	9.4	0.0	0.0
P-79	7.83	126.4	142.6	237	4.4	0.0	154.1	38.8	14.3	33.2	14.4	34.5	9.4	0.0	0.0
P-84	7.76	168.7	257.4	289	5.1	0.0	250.7	29.7	7.8	47.4	33.6	32.8	8.8	0.0	0.0
P-88	7.65	192.4	217.8	309	4.4	0.0	234.6	33.1	19.5	42.7	26.9	33.4	11.0	0.0	0.0
P-93	7.85	126.4	138.6	168	3.7	0.0	154.1	24.0	0.0	30.0	15.3	24.1	7.7	0.0	0.0
P-96	7.79	120.7	134.6	150	3.7	0.0	147.2	26.3	0.0	19.0	21.1	23.8	7.1	0.0	0.0
P-98	7.74	156.5	142.6	210	3.7	0.0	190.9	21.7	1.3	30.0	16.3	36.6	19.0	0.0	0.0
P-104	7.76	149.0	154.4	192	3.7	0.0	181.7	24.0	0.0	34.7	16.3	31.8	6.7	0.0	0.0
P-106	7.75	120.7	126.7	148	3.7	0.0	147.2	22.8	0.0	31.6	11.5	31.2	6.2	0.0	0.0
P-109	7.76	141.5	170.3	175	2.9	0.0	172.5	26.3	0.0	25.3	4.8	23.5	12.2	0.0	0.0
P-110	7.65	115.0	79.2	160	2.9	0.0	140.3	27.4	1.3	23.7	4.8	23.5	12.2	0.0	0.0
P-112	7.60	154.6	162.4	227	4.4	0.0	188.6	28.6	9.1	33.2	19.2	31.4	9.7	0.0	0.0
P-116	7.90	79.2	138.6	102	3.7	0.0	96.6	27.4	2.6	20.8	21.1	23.5	5.8	0.0	0.0

## 6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Aunque se tiene información de censos de aprovechamientos subterráneos levantados en el área del acuífero Huichapan-Tecozautla correspondientes a los años 1979 y 1988, no son del todo confiables para el estudio de todo el acuífero de Huichapan-Tecozautla, debido a que, por ejemplo, en 1979 solamente eran del orden de 44 alumbramientos, y para 1988, sólo reportaron 21 alumbramientos en la zona de El Astillero y 14 en la zona de Taguá.

En el estudio de 1996 fueron censados 172 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 118 eran pozos y 54 manantiales. Los volúmenes de extracción estimados resultaron de 25.1 hm<sup>3</sup> anuales en total, de los cuales 15.2 hm<sup>3</sup>/año se utilizaban para riego y 9.8 hm<sup>3</sup>/año para el suministro de agua potable. No se reportan las aportaciones de manantiales.

El año 1999 se censaron en el área que abarca la zona de estudio 142 aprovechamientos de agua como se muestra en las tablas siguientes.

**Tabla No. 7. Tipos de aprovechamiento acuífero Huichapan-Tecozautla.**

Municipio	Tipo aprovechamiento				
	Total	Manantial	Pozo	Noria	Geiser
Huichapan	41	8	33		
Nopala	7	1	6		
Tecozautla	94		91	2	1
<b>Total</b>	<b>142</b>	<b>9</b>	<b>130</b>	<b>2</b>	<b>1</b>

**Tabla No. 8. Total de aprovechamientos por uso acuífero Huichapan-Tecozautla.**

Municipio	Total de aprovechamientos por uso principal									
	Agrícola	Avícola	Doméstico	Pecuario	Industrial	P.U.	Recreativo	Servicios	Sin uso	Total
Huichapan	13	2			2	20		1	3	41
Nopala	1					6				7
Tecozautla	63	1	1	1		14	6		8	94
<b>Total</b>	<b>77</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>40</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>142</b>

**Tabla No. 9. Extracciones de agua subterránea en el acuífero Huichapan-Tecozautla**

Municipio	Total de volumen de extracción hm <sup>3</sup> año									
	Agrícola	Avícola	Doméstico	Pecuario	Industrial	P.U.	Recreativo	Servicios	Sin uso	Total
Huichapan	5.99	0.04			0.52	9.12		0.02	0.02	15.71
Nopala				0.95						0.95
Tecozautla	34.75		0.08	0.02		3.18	2.46			40.49
Sub-total	40.74	0.04	0.08	0.97	0.52	12.30	2.46	0.02	0.02	57.15

Como se puede observar, la mayor extracción ocurre en el municipio de Tecozautla, donde también se observan los mayores abatimientos del nivel del agua. La extracción estimada y anotada en la tabla anterior, coincide sensiblemente con los resultados obtenidos en el estudio del 2006, donde se censaron 157 aprovechamientos y la extracción total fue de 57.0 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 43.0 se destinan al uso agrícola, 12.2 hm<sup>3</sup> al público-urbano y 1.8 hm<sup>3</sup> a usos menores. En cuanto a la extracción por tipo de aprovechamiento, los pozos extraen 52.3 hm<sup>3</sup> mientras que los manantiales descargan 4.7 hm<sup>3</sup> anuales.

## 7 BALANCE HIDROMETEOROLÓGICO.

Para realizar el balance hidrometeorológico se requiere conocer entre otros parámetros, los volúmenes de escurrimiento que se presentan por lluvia dentro del área; es decir, es necesario determinar el volumen de agua que se genera por cuenca propia. Sin embargo, no se cuenta con aforos específicos que permitan cuantificar dicho volumen, en este sentido a continuación se menciona la forma de en que se procedió para obtenerlo. Conviene señalar que durante el estiaje el río Hondo no tiene escurrimientos.

Para determinar el volumen de escurrimiento debido a la lluvia se puede utilizar el método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, publicada en el Diario Oficial de la Federación, de fecha 17 de abril de 2002, que señala que en caso de que en la cuenca no se cuente con suficiente información para determinar el volumen anual de escurrimiento natural, se puede aplicar el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento.

El volumen anual medio de escurrimiento natural en términos genéricos es igual a la precipitación media anual por el área y por un coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento (Ce) se puede determinar, según la norma antes citada, en función del parámetro K que está en función del tipo y uso de suelo. Al respecto para la zona se consideró un valor de K= 0.28, que corresponde a suelos medianamente permeables, uso de suelo cubierto por vegetación del orden del 50% o menos, aplicando a su vez este valor de K en la ecuación:

$$Ce = K (P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5$$

Donde:

P= precipitación media anual en mm

Se obtiene un coeficiente de escurrimiento de Ce= 0.1278

El volumen de escurrimiento resultó de 100.7 hm<sup>3</sup>/año al multiplicar el coeficiente de escurrimiento por el volumen precipitado en el área, el cual es de aproximadamente 787.7

hm<sup>3</sup>/año, valor obtenido en un área de 1,448 km<sup>2</sup>, y una lámina de lluvia promedio de 544 mm/año.

La lámina promedio de lluvia de 544 mm/año se obtuvo al considerar la precipitación promedio de las estaciones ubicadas dentro de la zona.

Para conocer el orden de magnitud del volumen de infiltración por lluvia que se presenta en el sistema, se realizó el balance de agua superficial con apoyo en la fórmula de Coutagne para determinar la evapotranspiración y dejar como incógnita a la infiltración para lo cual se aplicó la siguiente expresión:

$$\text{Infiltración} = \text{precipitación} - \text{evapotranspiración} - \text{escurrimiento}$$

Para determinar la evapotranspiración real (ETR), se hizo uso de la fórmula de Coutagne, la cual indica que:

$$\text{ETR} = P - C P^2$$

Donde:

P = precipitación en m/año

C =  $1/(0.8+0.14t)$

T = temperatura en ° C

Como se señaló anteriormente en el área donde se localiza el acuífero Huichapan-Tecozaulta la precipitación promedio anual en toda el área, es del orden de 544 mm/año; esta lámina de lluvia proporciona un volumen total precipitado de 787.7 hm<sup>3</sup>/año. En cuanto a la temperatura promedio anual considerada ésta es del orden de 16.8° C, valores que sustituidos en la ecuación de Coutagne para calcular la evapotranspiración, dan un valor de 450.1 mm/año, que multiplicado por el área total da un volumen evapotranspirado de 651.8 hm<sup>3</sup>/año.

Ahora bien, si se sustituyen los valores antes calculados, tanto de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento en la ecuación que se planteó anteriormente para obtener el volumen infiltrado se tiene:

$$\text{Infiltración} = 787.7 - 651.8 - 100.7 = 35.2 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Al dividir este volumen anual promedio infiltrado, entre el volumen anual promedio precipitado, que es del orden de 787.7 hm<sup>3</sup>/año, se obtiene el coeficiente de infiltración, el cual resulta del orden de 0.0447.

Los valores que resultaron del balance hidrometeorológico se presentan en la tabla No. 10.

**Tabla No. 10. Balance hidrometeorológico.**

	hm <sup>3</sup> /año	
Volumen llovido	787.7	
Volumen evapotranspirado	651.8	82.7%
Volumen de Escurrimiento superficial	100.7	12.8%
Volumen Infiltrado	35.2	4.5%

Las estimaciones del balance hidrometeorológico realizadas en el estudio del 2006 se aplicaron a seis cuencas en las que se dividió el acuífero y que se muestran en la figura No. 17, para

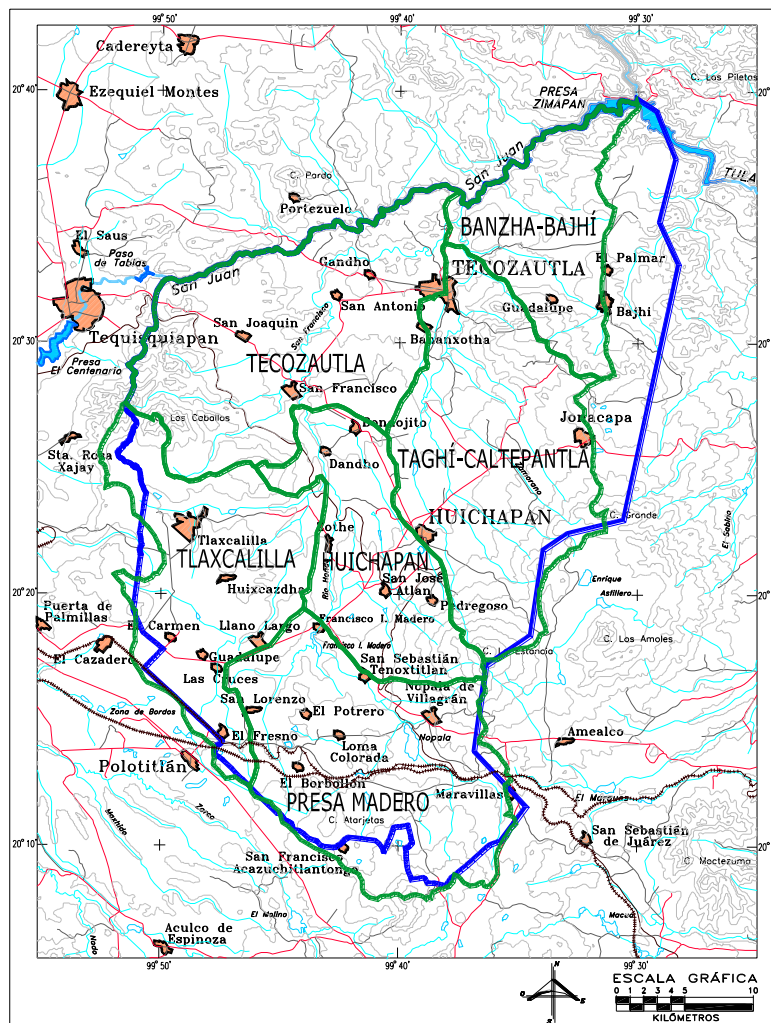


cada una de ellas se estimó el coeficiente de infiltración de la lluvia, esto se realizó mediante la fórmula de Turc y los resultados se muestran en la tabla No. 11.

El promedio de los coeficientes de infiltración según esta metodología arroja un valor de 4.7%, muy semejante al obtenido en párrafos anteriores. Según el estudio del 2006, para la definición de un coeficiente real de infiltración por recarga vertical de la lluvia, se debe considerar solo una fracción del obtenido en el balance hidrometeorológico de conformidad con las características geológicas y geomorfológicas en cada cuenca, fracción que se fijó en 0.35 y 0.55, para las diferentes cuencas, tal como se muestra en la tabla No. 11.

**Tabla No. 11. Balances hidrometeorológicos por cuencas**

Sub-cuenca	Área km <sup>2</sup>	Temp. °C	Precip. mm	ETR mm	Coef ETR	Esc Sup mm	Coef. ESC	Infil mm	Coef. Inf.	Corrección Geología	Coef de infil. Final
Tecoautla	319	16.3	421.3	400.2	95.0%	9.0	2.1%	12.1	2.87%	0.35%	1.0%
Huichapan	174	15.5	461.8	424.9	92.0%	18.2	3.9%	18.6	4.03%	0.35%	1.4%
Tlaxcalilla	235	15.6	478.5	437.6	91.5%	29.5	6.2%	11.4	2.38%	0.35%	0.8%
Taghi-Caltepantla	314	14.6	578.6	483.1	83.5%	55.8	9.6%	39.7	6.86%	0.55%	3.8%
Presa Madero	296	15.5	512.6	459.1	89.6%	21.6	4.2%	31.9	6.22%	0.35%	2.2%
Banza-Bajhi	128	15.3	525.0	465.7	88.7%	28.4	5.4%	31.0	5.90%	0.55%	3.3%



**Figura No. 17. Cuencas y Áreas de balance**

## 8 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente por el almacenamiento del acuífero.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad \dots (1)$$

Aplicando esta ecuación al acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento del acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento en el acuífero} \quad \dots(2)$$

La ecuación de balance definida, en función del modelo conceptual de funcionamiento del acuífero, es la siguiente:

$$E_h + R_v + R_{in} - (B + S_h + D_m) = \pm \Delta V(S_y)$$

Donde:

$E_h$	Entradas por flujo subterráneo
$R_v$	Recarga vertical de la precipitación pluvial
$R_{in}$	Recarga inducida
$B$	Extracción por bombeo
$S_h$	Salidas por flujo subterráneo
$D_m$	Descargas de manantiales
$\Delta V$	Cambio de almacenamiento
$S_y$	Rendimiento específico

Esta ecuación de balance se aplicó para cada una de las seis subcuencas en que dividió el acuífero, dejando como incógnita el valor del rendimiento específico, y los valores de los diferentes términos que la componen se estimaron a partir de la información generada, tanto del balance hidrometeorológico, como de las configuraciones de los niveles estáticos, las superficies regadas con agua superficial y subterránea y de las fugas de agua potable donde se ubican las poblaciones urbanas y rurales.

A continuación se describe la forma en que se estimaron cada uno de los componentes.

### 8.1 ENTRADAS

Las entradas al acuífero Huichapan-Tecozaulta están integradas básicamente por las recargas naturales y las recargas inducidas.

#### 8.1.1 Recarga natural ( $R_v$ )

La recarga natural está constituida por la recarga directa de la infiltración de la lluvia y por las entradas por flujo subterráneo. La primera componente se calculó para dos fechas, 1999 y para un promedio a largo plazo, sus valores por cuenca se muestran en la tabla No. 12, aplicando los coeficientes de infiltración mostrados en la tabla No. 11.



**Tabla No. 12. Infiltración por lluvia en las áreas de balance**

	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecoautla	Banzha-Bajhi	GLOBAL
Área de balance (km <sup>2</sup> )	183.5	230.9	136.0	245.1	248.8	100.2	<b>1144.3</b>
Coeficiente de Infiltración	0.8%	2.2%	1.4%	3.8%	1.0%	3.3%	
Subcuenca Hidrológica-Hidrogeológica para la precipitación en 1999							
Lluvia en el año de 1999 (mm)	505.2	315.0	332.0	350.3	302.5	525.0	
Infiltración precipitación (hm <sup>3</sup> /año)	1.0	2.1	0.8	4.2	1.0	2.2	<b>11.3</b>
Subcuenca Hidrológica-Hidrogeológica para la precipitación media							
Precipitación media (mm)	356.4	399.5	283.0	578.6	421.1	525.0	
Infiltración precipitación (hm <sup>3</sup> /año)	0.5	2.0	0.5	5.4	1.0	1.7	<b>11.1</b>
Media	0.8	2.1	0.7	4.8	1.0	2.0	<b>11.4</b>

Las entradas por flujo subterráneo se calcularon también para dos fechas, una en 1999 y la otra en el 2006, al aplicar la Ley de Darcy sobre los canales de flujo que se muestran en figura No. 15. El resultado del promedio para ambos años de entradas y salidas subterráneas por cuenca, se muestra en la tabla No. 13.

**Tabla No. 13 Flujos subterráneos**

	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecoautla	Banzha-Bajhi	GLOBAL
<b>Datos de 1999</b>							
Entradas	3.3	4.8	2.5	16.7	29.3	2.4	<b>37.7</b>
Salidas	0.7	3.2	5.5	12.6	23.6	2.1	<b>25.6</b>
<b>Datos del 2006</b>							
Entradas	2.5	6.4	2.2	16.3	27.4	3.9	<b>37.2</b>
Salidas	0.8	2.6	5.5	13.5	28.2	3.2	<b>31.4</b>
<b>Promedio</b>							
Entradas	2.9	5.6	2.4	16.5	28.4	3.2	<b>37.5</b>
Salidas	0.7	2.9	5.5	13.1	25.9	2.6	<b>28.5</b>

Es importante señalar que debido a la continuidad hidráulica entre las subcuencas, lo que representa la salida para una es entrada para otra. Esto se tomó en consideración para no duplicar cantidades en el balance global. Por ejemplo, para la subcuenca denominada Presa Madero-Nopala, las salidas por flujo subterráneo se convierten en entradas para la subcuenca de Huichapan. De la misma forma las salidas por flujo subterráneo de la subcuenca de Huichapan son entradas para Tecozautla. En la columna de la derecha se muestran los valores netos para cada cuenca tomados del estudio realizado en el 2006.

De acuerdo con las tablas Nos. 12 y 13, la recarga natural resulta ser de 48.9 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales **11.4 hm<sup>3</sup>/año corresponden a la infiltración de la lluvia (Rv) y 37.5 hm<sup>3</sup>/año por entradas horizontales (Eh).**

### 8.1.2 Recarga inducida (R<sub>in</sub>)

Para el cálculo de la recarga inducida por el uso del agua subterránea, se consideró un coeficiente de 0.15 para el agua subterránea destinada al uso público urbano y 0.07 para la destinada al uso agrícola. Adicionando a la recarga inducida el 20% del volumen de 16.3 hm<sup>3</sup>/año de agua superficial que proviene de la presa Madero (de acuerdo con el estudio del 2006). En la tabla No. 16 se muestra el volumen de cada componente de la recarga inducida,

para cada cuenca, para 1999 y 2006, así como el promedio. El valor de la recarga inducida es de **7.8 hm<sup>3</sup> anuales**.

**Tabla No. 14 Recarga inducida**

	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecoautla	Banzha-Bajhi	GLOBAL
Datos de 1999							
Retorno publico urbano	0.1	0.2	0.0	0.7	0.6	0.0	<b>1.6</b>
Retorno de riego	0.0	0.0	0.1	0.7	5.1	0.3	<b>6.2</b>
Datos del 2006							
Retorno publico urbano	0.1	0.2	0.0	0.7	0.3	0.0	<b>1.3</b>
Retorno de riego	0.0	0.0	0.1	0.8	5.1	0.3	<b>6.3</b>
Promedio							
Retorno de riego	0.1	0.2	0.0	0.7	0.5	0.0	1.5
Retorno publico urbano	0.0	0.0	0.1	0.8	5.1	0.3	6.3
<b>Total retorno</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.5</b>	<b>5.6</b>	<b>0.3</b>	<b>7.8</b>

Por lo tanto, de acuerdo con lo anterior, la recarga total en la zona del acuífero resultó de 56.7 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 48.9 es recarga natural y 7.8 inducida.

**Rt = 56.7 hm<sup>3</sup> anuales.**

## 8.2 SALIDAS

### 8.2.1 Evapotranspiración (ETR)

Debido a que en la zona las profundidades al nivel del agua subterránea superan los 30 m, se considera que no existen salidas por evapotranspiración.

### 8.2.2 Descarga natural por manantiales (Dm)

De acuerdo al volumen estimado que aportan los manantiales de cada una de las subcuencas, según los censos de 1999 y 2006, la descarga por manantiales es de **5.0 hm<sup>3</sup>/año**. Es importante mencionar que en este concepto no se incluyeron los manantiales de Taxhidó, pues en estricto sentido están fuera del área administrativa del acuífero Huichapan-Tecoautla. Sin embargo, con las estimaciones de salida por flujo horizontal se puede establecer una relación estrecha, puesto que parte de estas salidas representan la descarga a los manantiales mencionados.

**Tabla No. 15 Descarga por manantiales**

Zona	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecoautla	Banzha-Bajhi	GLOBAL
Datos de 1999							
Manantiales	0.0	0.4	2.9	1.8	0.1	0.0	<b>5.2</b>
Datos del 2006							
Manantiales	0.0	0.4	2.6	1.6	0.1	0.0	<b>4.7</b>
Promedio							
Manantiales	0.0	0.4	2.8	1.7	0.1	0.0	5.0

### 8.2.3 Bombeo (B)

Según los censos de aprovechamientos subterráneos realizados en 1999 y 2006, las extracciones por bombeo y por cuencas resultó de 52.0 y 52.3 hm<sup>3</sup>/año, respectivamente para los años mencionados. El valor que se considera para fines del balance es de **52.3 hm<sup>3</sup>/año**

**Tabla No. 16. Extracción por bombeo**

Zona	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecozautla	Banzha-Bajhi	GLOBAL
Datos de 1999							
Extracción	0.6	1.6	1.0	14.8	29.8	4.2	<b>52.0</b>
Datos del 2006							
Extracción	0.6	1.6	1.1	15.5	29.1	4.4	<b>52.3</b>

### 8.2.4 Flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas por flujo horizontal fueron calculadas de la misma manera que las entradas, aplicando la Ley de Darcy sobre las celdas identificadas en la figura No. 15. De acuerdo con la tabla 13, las salidas globales del acuífero, por flujo subterráneo ascienden a **28.5 hm<sup>3</sup>/año**, calculadas como promedio de las redes de flujo correspondientes a los años de 1999 y 2006.

### 8.3 CAMBIO DE ALMACENAMIENTO ( $\Delta V$ )

El cambio de almacenamiento se calculó a partir de la evolución de los niveles del agua para el periodo 1999-2006 (figura No. 16) y estimando en forma anual. Para cada subcuenca se estimó un volumen drenado o almacenado según sea el caso, a partir de los valores de evolución generados. Estos valores se promediaron y se multiplicaron por el área correspondiente de cada subcuenca.

Como se mencionó anteriormente, el valor del rendimiento específico se definió como incógnita en la ecuación de balance, de tal forma que para cada año (1999 y 2006) se dedujo el valor a partir de la diferencia entre en total de entradas y salidas y el volumen drenado o almacenado por subcuenca. Los valores encontrados varían entre 0.03 y 0.06.

Con los valores obtenidos para cada una de las componentes de la ecuación de balance, en cada subcuenca, se obtuvo el promedio de ambos años y con ellos se elaboró la tabla No. 17. Es importante destacar que la suma global de las componentes de entradas y salidas horizontales, no coincide con los datos de la columna denominada GLOBAL, debido a las condiciones de interconexión entre las subcuencas.

De esta manera y con los resultados obtenidos que se muestran en las tablas Nos. 12 a 16, en la tabla No. 17 se muestra el balance general para todo el acuífero Huichapan-Tecozautla, en la que se observa que el minado es de 29 hm<sup>3</sup>/año.

**Tabla No. 17 Balance de aguas subterráneas (1999-2006) (hm<sup>3</sup>/año)**

	Tlaxcalilla	Presa Madero	Huichapan	Taguí-Caltepan	Tecozaulta	Banzha-Bajhi	GLOBAL
Recarga por lluvia	0.8	2.1	0.7	4.8	1.0	2.0	11.4
Flujo subterráneo	2.9	5.6	2.4	16.5	28.4	3.2	<b>37.5</b>
<b>Recarga natural</b>	<b>3.7</b>	<b>7.7</b>	<b>3.1</b>	<b>21.3</b>	<b>29.4</b>	<b>5.2</b>	<b>48.9</b>
Riego	0.0	0.0	0.1	0.8	5.1	0.3	6.3
Público urbano	0.1	0.2	0.0	0.7	0.5	0.0	1.5
<b>Recarga inducida</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>	<b>1.5</b>	<b>5.6</b>	<b>0.3</b>	<b>7.8</b>
<b>Recarga total</b>	<b>3.8</b>	<b>7.9</b>	<b>3.2</b>	<b>22.8</b>	<b>35.0</b>	<b>5.5</b>	<b>56.7</b>
Flujo horizontal	0.8	2.9	5.5	13.1	25.9	2.7	<b>28.5</b>
Bombeo	0.6	1.6	1.1	15.2	29.5	4.3	52.3
Manantiales	0.0	0.4	2.8	1.7	0.1	0.0	5.0
<b>Descarga total</b>	<b>1.4</b>	<b>4.9</b>	<b>9.4</b>	<b>30.0</b>	<b>55.5</b>	<b>7.0</b>	<b>85.8</b>
<b>Minado</b>	<b>2.4</b>	<b>3.0</b>	<b>-6.2</b>	<b>-7.2</b>	<b>-20.5</b>	<b>-1.5</b>	<b>-29.1</b>
Rendimiento específico	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.04	
Cambio de Almacenamiento	83.4	118.8	-179.2	-144.8	-332.3	-29.6	<b>-483.8</b>
Área de balance (km <sup>2</sup> )	235.2	296.0	174.3	314.2	319.0	128.4	<b>1467.1</b>
Evolución media (m)	0.3	0.4	-1.0	-0.5	-1.0	-0.2	<b>-0.3</b>

## 9 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\text{Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica} = \text{Recarga total media anual} - \text{Descarga natural comprometida} - \text{Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA} \quad (3)$$

### 9.1 RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL

La recarga total media anual (Rt) que corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural (48.9 hm<sup>3</sup>), más la recarga inducida (7.8 hm<sup>3</sup>), resultó para este caso de **56.7 hm<sup>3</sup>/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

### 9.2 DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA

Como descarga natural comprometida se considera a los manantiales que afloran dentro de los límites del acuífero (tabla No. 15) más los flujos subterráneos que salen de él hacia el río San Juan, y que seguramente descargan en el río Moctezuma y posteriormente se utilizan en la presa Zimapán (tabla No. 13). El primero tiene un valor de 5.0 hm<sup>3</sup>/año y el segundo de 28.5 hm<sup>3</sup>/año, ambos valores como promedio de las condiciones de 1999 y 2006. Por lo tanto la descarga natural comprometida resulta de **33.5 hm<sup>3</sup>/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

### 9.3 RENDIMIENTO PERMANENTE

El rendimiento permanente es la recarga total media anual menos la descarga natural comprometida. Para el acuífero Huichapan-Tecozaulta la descarga natural es de 33.5 hm<sup>3</sup>/año, por lo que el rendimiento permanente es igual a **23.2 hm<sup>3</sup>/año** (Millones de metros cúbicos anuales).

### 9.4 VOLUMEN CONCESIONADO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El volumen anual de extracción, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al 30 de abril del 2007 es de 36.248678 hm<sup>3</sup>/año (Millones de metros cúbicos anuales).

### 9.5 DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La disponibilidad de aguas subterráneas, conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA, que de acuerdo con la expresión (3), resultó ser de **-13'048,678 m<sup>3</sup>/año**, por lo que no existe disponibilidad para otorgar nuevas concesiones.

$$\mathbf{-13'048,678 \quad = \quad 56'700,000 \quad - \quad 33'500,000 \quad - \quad 36'248,678}$$

## 10 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Anuario Estadístico de Hidalgo, INEGI, 2004.

Campa *et.al*, 1976. La Cabalgadura Laramídica del Dominio Volcánico Sedimentario (Arco Alisitos-Teloloapan) sobre el Miogeosinclinal Mexicano en los Límites de los Estados de Guerrero y México. Acapulco, Gro., Memorias del III Congreso Latinoamericano de Geología.

Comisión Nacional del Agua, Integración de la lluvia normal anual de la República Mexicana, período 1931-1990

Comisión Nacional del Agua, Sistema de Información Geográfica del Agua Subterránea (SIGMAS).

Comisión Nacional del Agua. Subgerencia de Exploración Geohidrológica, 1991. Exploración Geofísica Complementaria en Diversas Zonas del Estado de Hidalgo, como apoyo al convenio de perforación. Exploraciones Coordinadas S.A de C.V.

Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas, 1993. Trabajos de Piezometría en el valle de Huichapan-Tecozautla, Estado de Hidalgo. Sistemas y Proyectos Futura, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas, 1996. Estudio Geohidrológico de la Zona de Huichapan-Tecozautla, Estado de Hidalgo. Lesser y Asociados S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en el Estado de Hidalgo, 2006. Estudio de Actualización Hidrogeológica de la Unidad Geohidrológica Huichapan-Tecozautla, en el estado de Hidalgo.

Demant, Alain. 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación.

Gobierno del estado de Hidalgo, 1990. Estudio Geofísico-Geohidrológico en 14 zonas correspondientes al municipio de Huichapan, Hgo. GEOFIMEX, S.A.

Gobierno del estado de Hidalgo, 1990. Estudio Geofísico-Geohidrológico en el Municipio de Huichapan, Hgo. Zonas de Ninthí, Apartadero y El Tendido. GEOFIMEX, S.A.

Landforms of Mexico. E. Raisz, Massachusets. 1964.

Secretaría de Recursos Hidráulicos. 1970. Subdirección de Hidrología, Boletín Hidrológico No. 45, Región Hidrológica No. 26 Parcial, Cuenca Río Tula, 1970.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1970. Informe final del Estudio Geohidrológico del Valle del Mezquital y Zonas Adyacentes.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1973. Estudio Geohidrológico en la Zona Suroeste de Huichapan, Estado de Hidalgo. Geofimex, S.A., para la SRH. 1973.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1974. Estudio Geofísico en el Estado de Hidalgo. Zona de La Sabina. GEOFIMEX, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Residencia de Geohidrología y de Zonas Áridas, 1978. Estudios Geohidrológicos Complementarios en los Municipios de Tecozautla y Huichapan, Hgo. GEOCALLI, S.A.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Dirección de Proyectos de la Subsecretaría de Desarrollo Urbano, 1986. Informe al Estudio Correspondiente al Estudio Geoeléctrico Efectuado en Jonacapa, Municipio Huichapan, Estado de Hidalgo.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Dirección de Estudios de la Dirección General de Captaciones y Conducciones de Agua, 1988. Estudio de Prospección Geohidrológica en el Valle de Huichapan y la Caldera El Astillero, para definir Zonas de Explotación para Abastecimiento de Agua a la Ciudad de Huichapan, Estado de Hidalgo. Técnicas Geológicas y Mineras S.A. de C.V. (TEGMIN).

Seegerstrom, K., 1961. Geología del Suroeste del Estado de Hidalgo y del Noreste del Estado de México. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Vol. 13 P. 147-168.

Silva Mora, Luis. Instituto de Geología. UNAM. 1991. La Caldera de Huichapan o de El Astillero.

Silva Mora, Luis y Córdoba, Diego A. 1996. Vulcanismo Explosivo al Norte y Oeste de la Ciudad de Tula, Edo. de Hidalgo.

Silva-Mora, L., 1979. Contribution a la connaissance de laxe volcanique Transmexicano Etude geologique et petrologique des laves du Michoacán oriental. Universite de Droit, économie et des sciences Daix-Marseille III, Marsella Francia. Tesis doctor ingeniero.