

Geohidrología del Valle de Zimatlán, Oaxaca, México

*Rubén Chávez Guillén**

1 INTRODUCCION

LOCALIZACION DEL AREA ESTUDIADA

El valle de Zimatlán se encuentra ubicado en la porción central del Estado de Oaxaca, entre los paralelos $16^{\circ} 42'$ y $17^{\circ} 04'$ de latitud Norte y entre los meridianos $96^{\circ} 34'$ y $96^{\circ} 52'$ de longitud Oeste. Tiene una superficie aproximada de 350 km^2 ; sus límites son: al Oriente, las sierras de San Antonio de la Cal, Magdalena y Taviche; al Poniente, las sierras de Peras, Clavelinas y San Miguel; al Norte se comunica con el valle de Etna, y al Sur, se estrecha gradualmente hasta reducirse a una garganta.

El valle forma parte de la cuenca del Río Atoyac, el cual lo cruza longitudinalmente; su longitud es de unos 35 km. y su ancho medio de unos 10 km. En su extremo Norte se encuentra clavada la ciudad de Oaxaca, capital del Estado. La Fig. No. 1, ilustra la localización del área estudiada.

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos principales del presente estudio fueron la determinación del volumen de agua subterránea que puede aprovecharse del acuífero

del valle de Zimatlán, y la formulación de un plan para su explotación futura.

Para alcanzar dichos objetivos fue necesario estudiar los aspectos siguientes:

- a). Identificación de las formaciones acuíferas y definición de su geometría.
- b). Observación del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para definir los mecanismos de recarga y descarga del acuífero.
- c). Muestreo del agua subterránea para tener conocimiento de la calidad del agua y de su distribución en el área.
- d). Definición de las características hidráulicas del acuífero.
- e). Investigación de las condiciones actuales de explotación del acuífero.
- f). Determinación de la recarga del acuífero.
- g). Investigación de la relación agua superficial-agua subterránea.

II. CLIMATOLOGIA

GENERALIDADES

El clima del valle de Zimatlán es templado y con lluvias en verano. En la clasificación climática de Koeppen, corresponde al seco estepario (Bshwgi).

* Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

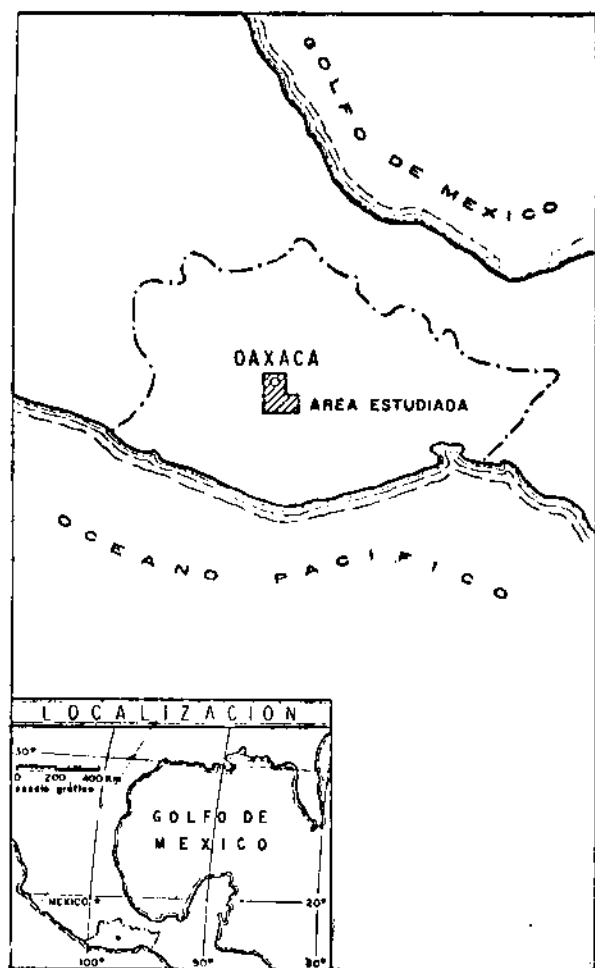


Fig. 1.— Localización del área estudiada.

Distribuidas en el valle se encuentran instaladas varias estaciones climatológicas, de las cuales se han seleccionado las denominadas: Oaxaca, Coyotepec y Ocotlán, para analizar las características del clima en el área estudiada. La localización de las estaciones se muestran en la Fig. 2.

PRECIPITACION PLUVIAL

La precipitación en el valle de Zimatlán es más o menos uniforme. La Fig. 3, muestra la variación de la precipitación anual registrada en las estaciones: Oaxaca, Coyotepec y Ocotlán, en el intervalo 1962–1972. La precipitación media anual en este intervalo fue del orden de 650 mm., en años secos la precipitación es del orden de 400 a 500

mm. mientras que en años lluviosos, rebasa los 900 mm.

Se carece de estaciones en las partes altas de las sierras limítrofes, pero obviamente la precipitación que ahí ocurre debe ser bastante mayor que en el valle.

En el año existe sólo una temporada de lluvias, en los meses de abril a octubre. En la Fig. 4, se ilustra la distribución de la precipitación media mensual en el intervalo 1962–1972, para cada una de las estaciones señaladas. Los meses más lluviosos son junio y agosto, en los que ocurren precipitaciones entre 130 y 190 mm.

TEMPERATURA

La temperatura media anual varía entre 15 y 21 °C. Las temperaturas máximas ocurren en los meses de marzo a junio, y varían entre 32 y 39°C. En los meses de noviembre a febrero ocurren las temperaturas mínimas, entre 0 y 8°C, aunque ocasionalmente descienden varios grados bajo cero.

EVAPORACION POTENCIAL

La evaporación potencial anual varía entre 1.5 y 2.1 m. La evaporación más intensa ocurre en los meses de febrero a julio.

III. GEOLOGIA SUBTERRANEA

GEOLOGIA SUBTERRANEA DEL VALLE DE ZIMATLAN

El relleno aluvial del valle de Zimatlán es de espesor reducido y de sección muy irregular; la Fig. 5, ilustra su distribución aproximada. Puede observarse que su espesor es mayor en la porción central del valle, donde varía entre 60 y 110 m. y se adelgaza hacia los límites del mismo; en el extremo norte del valle se detectó un espesor de 250 m. pero al parecer, se trata de una depresión muy localizada. En la Fig. 11, se muestra una sección geológica longitudinal del valle.

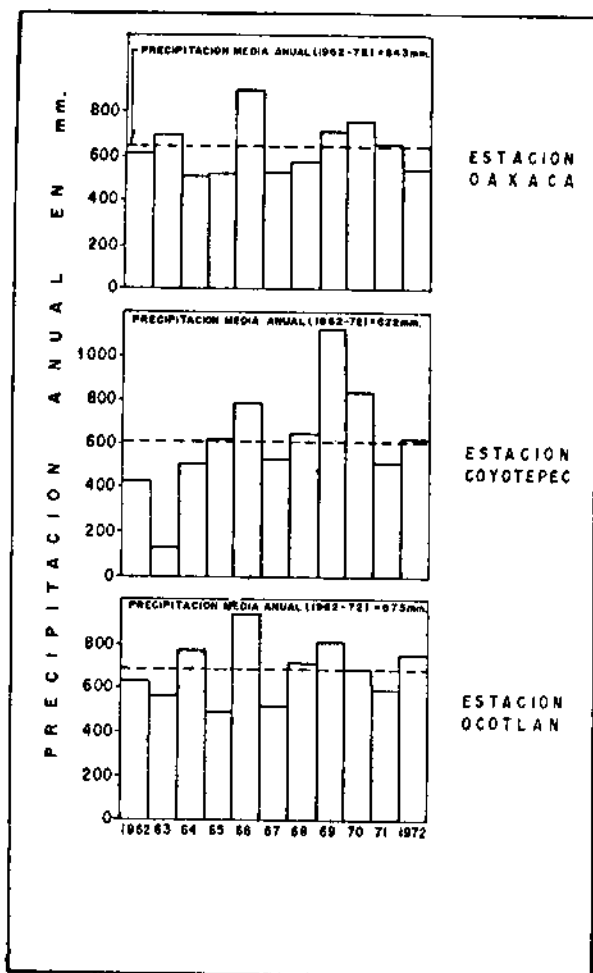


Fig. 3.— Precipitación anual registrada en estaciones seleccionadas del Valle de Zimatlán, Oax.

El basamento rocoso está constituido principalmente por rocas metamórficas (gneiss granítico); en la porción sur del valle se encontró también caliza (Pozo POB-8) y riolita (Pozo POB-18) subyaciendo al relleno aluvial.

Sobre la roca sana, se encuentra una capa, de varios metros de espesor, de material alterado derivado de la misma roca.

Tomando en cuenta la posición actual de los niveles freáticos (entre 3 y 8 m. de profundidad), el espesor saturado del acuífero varía entre 10 y 90 m. aproximadamente. Las mayores secciones saturadas se encuentran en la porción central del valle, y las menores hacia los bordes del mismo.

En general, el acuífero presenta condiciones poco favorables para la explotación del agua subterránea: primero, porque su reducida extensión lateral limita su capacidad de almacenamiento, y segundo, porque los materiales gruesos que lo constituyen se encuentran casi siempre mezclados con materiales finos que reducen su permeabilidad.

IV. HIDROLOGIA SUPERFICIAL

El Río Atoyac es la corriente más importante del valle de Zimatlán. Nace en la sierra de Sedas con el nombre de Río Etlá; escurre de Noroeste a Sureste por el valle de mismo nombre, donde recibe la aportación de numerosos arroyos, y entra al valle de Zimatlán por su extremo Norte. En este valle escurre de Norte a Sur; a unos 5 km. aguas

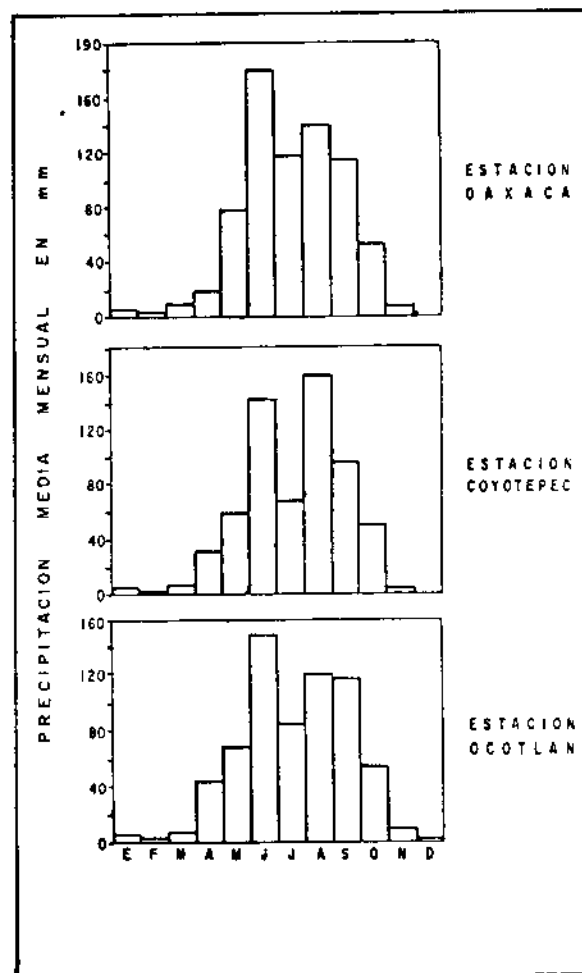


Fig. 4.— Precipitación media mensual (1962-1972), en estaciones seleccionadas del Valle de Zimatlán, Oax.

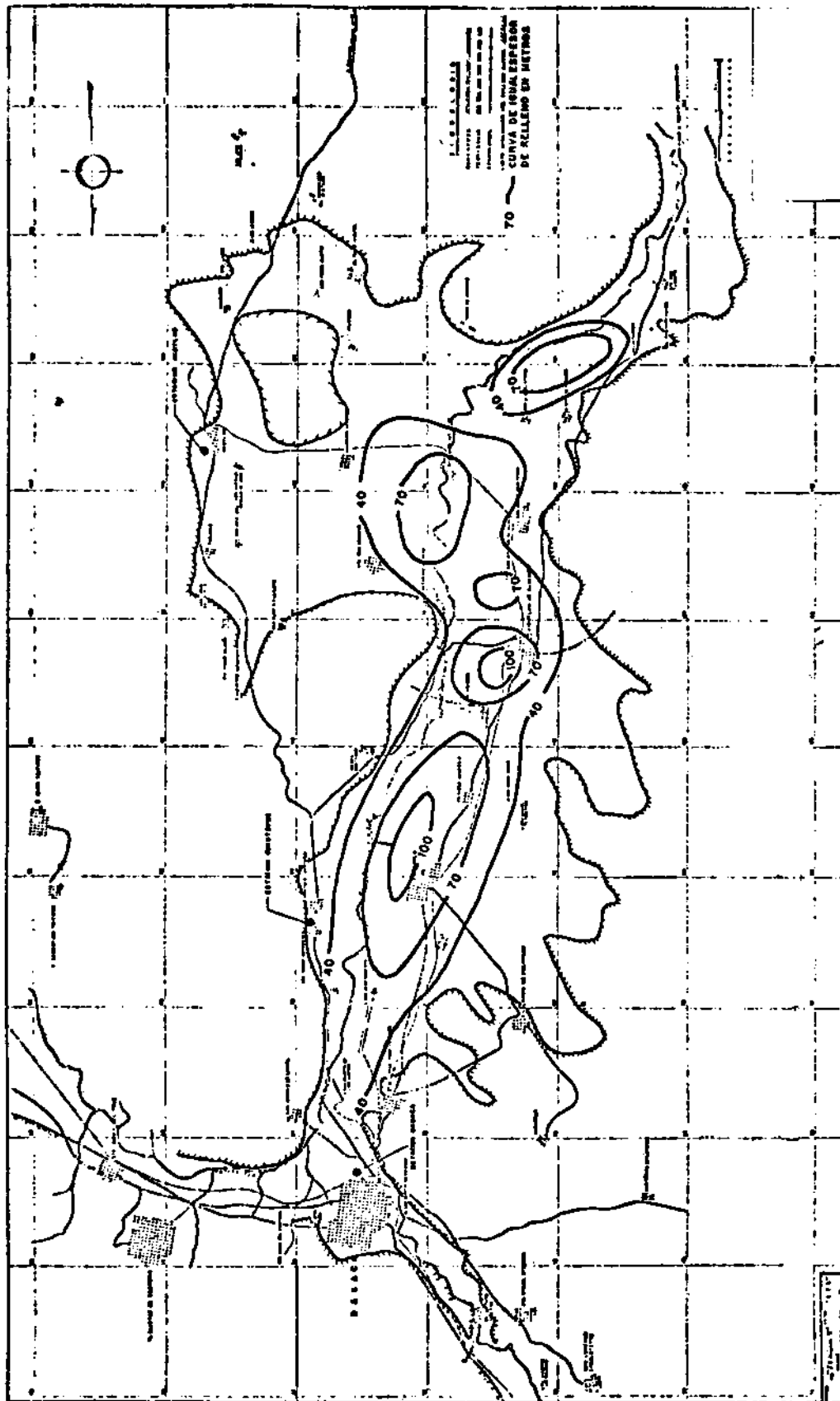


Fig. 5. - Distribución aproximada del espesor del relleno.

abajo de la ciudad de Oaxaca, confluye con el río Salado, corriente principal del valle de Tlacolula; continúa hacia el Sur, ya con el nombre de Río Atoyac, recibiendo varios arroyos tributarios provenientes de las sierras limítrofes, y sale del valle por su extremo Sur.

Desde su nacimiento hasta su confluencia con el Río Salado, el Río ETLA es intermitente; aguas abajo de la misma población y hasta la salida del valle de Zimatlán, es perenne. Su afluente principal, el Río Salado, es también perenne.

En la porción central del valle, entre las poblaciones de Zimatlán y Zaachila, los escurrimientos torrenciales de los arroyos de Zimatlán y Trinidad tributarios del Río Atoyac por su margen derecha—, aunados a la topografía plana y a la baja capacidad de infiltración de los materiales superficiales (arcilla), originan inundaciones que duran hasta varios meses después de la temporada de lluvias.

Con el propósito de conocer el régimen de escurrimiento del Río Atoyac, y la interrelación que existe entre este río y el acuífero, se instalaron 4 estaciones hidrométricas, cuya localización se muestra en el plano No. 2. Del análisis de los hidrogramas de las estaciones, se ha concluido que el Río Atoyac funciona como un drenaje del acuífero, del cual recibe un volumen anual del orden de 1 millón de m³.

V. HIDROGEOQUIMICA

El agua subterránea es de muy buena calidad, su salinidad total varía entre 200 y 600 ppm. La variación en el área de la salinidad y de algunos contendios iónicos, indica que la alimentación más importante del acuífero ocurre en su porción noroccidental. No se identificó ninguna influencia de la descarga de aguas negras de la ciudad de Oaxaca, en la calidad de agua subterránea.

VI. HIDROLOGIA SUBTERRANEA

FLUJO SUBTERRANEO

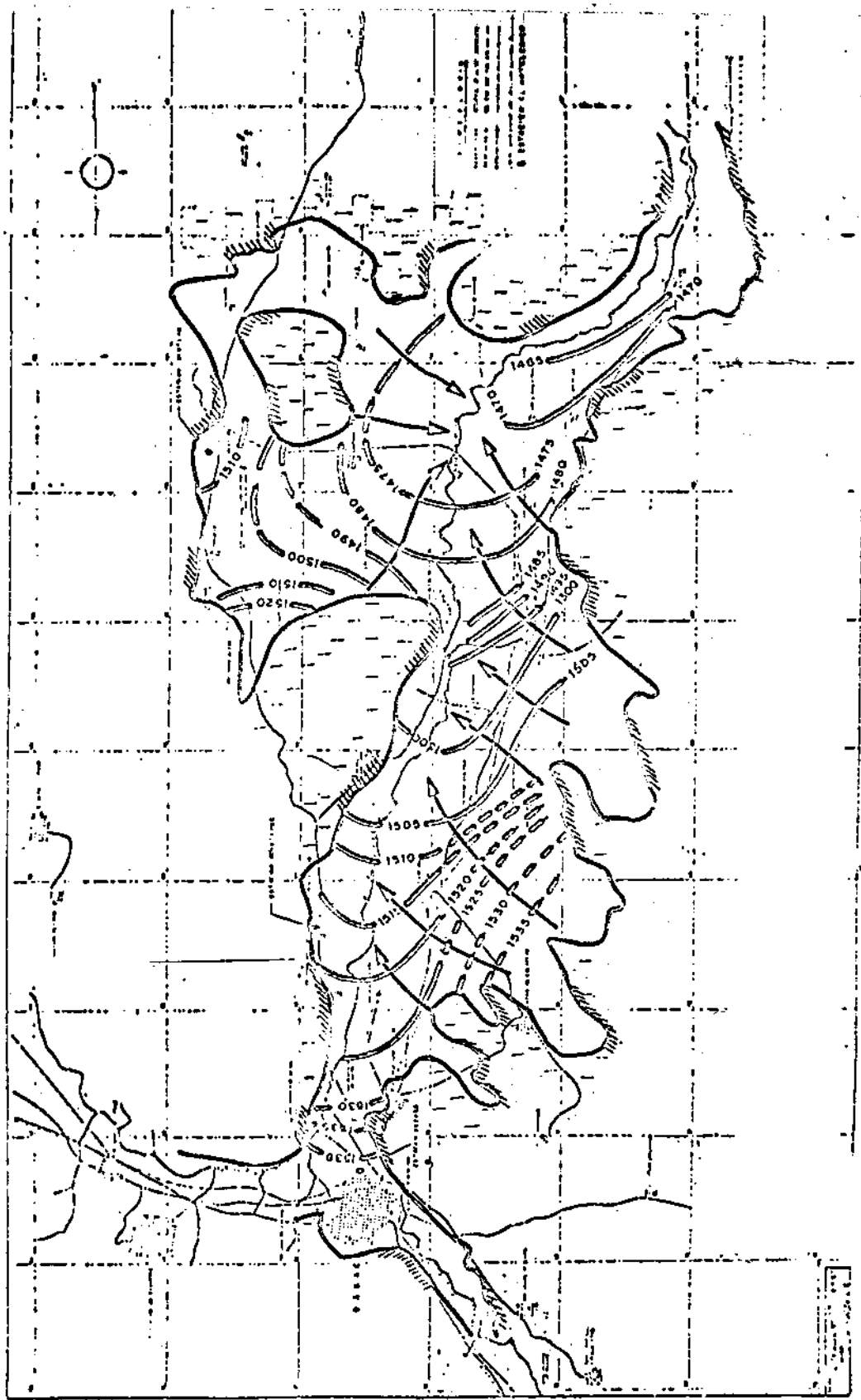
Para conocer el movimiento del agua en el subsuelo, se refirieron los niveles estáticos al nivel

del mar, mediante las elevaciones de brocal de los pozos de observación, y se configuraron las curvas de igual elevación de nivel estático, representativas de las curvas equipotenciales de la red de flujo subterráneo.

Dado que los pozos particulares son muy someros y penetran apenas unos cuantos metros en la zona de saturación, se considera su nivel de agua como representativo del nivel freático. En cambio, el nivel de agua en los pozos de exploración corresponde al nivel piezométrico medio de todo el espesor saturado (nivel estático). No obstante esto, no se observó diferencia apreciable entre las elevaciones piezométricas de los pozos de exploración y la de pozos particulares próximos, por lo que la configuración piezométrica se apoyó en unas y otras. Por la misma razón, en adelante se hará referencia a los niveles de agua en todos los pozos, como niveles freáticos o como niveles estáticos indistintamente.

En la Fig. 6, se ilustra la configuración de niveles estáticos, correspondiente al mes de julio de 1972. Como puede observarse, el flujo subterráneo entra al valle de Zimatlán por su extremo norte, a través del estrechamiento que lo comunica con los valles de ETLA y Tlacolula. En el valle de Zimatlán la dirección predominante del flujo es de Norte a Sur. A todo lo largo del valle se aprecian aportaciones laterales generadas por infiltración en los flancos de las sierras limítrofes; en particular, son notables la aportación proveniente del límite occidental entre las poblaciones de Zaachila y Zimatlán, y la proveniente del límite Oriental en la mitad Sur del valle.

Se observa además, que el Río Atoyac se comporta como efluente (drenaje del acuífero) en todo el valle, es evidente el flujo hacia el río desde ambos márgenes. En el extremo sur del valle, aguas abajo de la población de San Juan Guelatova, la dirección del flujo subterráneo es casi normal a la del río, lo cual significa que prácticamente la totalidad de la descarga del acuífero tiene lugar a lo largo del Atoyac, y poco escapa del valle subterráneamente. Esto se debe a que hacia aguas abajo la sección del relleno se reduce y prácticamente desaparece, lo que obliga al agua subterránea a aflorar en el cauce.



71 Fig. 6.— Valle de Oaxaca.— Configuración de niveles estáticos en 1974.— Obsérvese el flujo hacia el río y el incremento del gradiente en los estrechamientos del Valle

Los gradientes hidráulicos son muy variables. En la mitad Norte del valle varían entre 1.5 y 20 al millar; en su extremo Norte y en su porción Occidental, es de 5 y 7 al millar; en las proximidades del río los gradientes son menores, del orden de 1.5 a 3 al millar; en los alrededores de la población de Zimatlán, donde el valle se estrecha, se tienen los gradientes mayores, del orden de 20 al millar. En la mitad Sur del valle, los gradientes varían entre 1 y 15 al millar, encontrándose los mayores en la periferia del valle, y los menores en su porción central, en las proximidades del río.

La distribución de gradientes descrita, está en concordancia con la distribución de la litología y del espesor del relleno; los gradientes mayores se encuentran en las áreas donde el relleno tiene menos espesor y/o menor permeabilidad, o donde el ancho del flujo es reducido. Por ejemplo: el gradiente hidráulico máximo se presenta en el área donde el valle tiene su ancho menor, y los gradientes menores se encuentran en las proximidades del río, donde los materiales son más gruesos y el espesor de relleno más potente.

EVOLUCION PIEZOMETRICA

En las Figs. 7 y 8, se muestran los hidrógrafos de norias y pozos de observación seleccionados; también se muestra con fines comparativos, la distribución de la lluvia, registrada en la estación climatológica más próxima a cada pozo.

Como puede apreciarse en las mismas figuras, la evolución descrita guarda una estrecha relación con la distribución de la precipitación mensual; la época de lluvias coincide con el período de recuperación de los niveles freáticos y las máximas elevaciones de éstos se presentan en los meses de mayor precipitación.

La Fig. 9, ilustra la evolución de los niveles freáticos ocurrida en el intervalo marzo—septiembre de 1972.

De acuerdo con lo indicado en el inciso anterior, en este intervalo los niveles freáticos ascendieron en todo el valle; por consiguiente, la evolución representada refleja la distribución de la recarga en el área.

Puede observarse que en el citado intervalo los niveles freáticos ascendieron entre 0.2 y más de 2 m. Las evoluciones mayores (de 1.5 a más de 2 m.) ocurrieron en el extremo norte del valle, entre la ciudad de Oaxaca y el poblado de Santa Cruz Xoxocotlán, y en la porción Occidental del mismo, entre las poblaciones de Zaachila y Zimatlán.

En las proximidades del Río Atoyac, la recuperación de los niveles freáticos fue del orden de 0.5 m. en la mitad Norte del valle, y de poco más de 1 m. en la mitad Sur. En la porción Sur—Oriental del valle, se observaron recuperaciones entre 0.4 y poco más de 1 m.

PROFUNDIDAD A LOS NIVELES FREATICOS

En el valle de Zimatlán el agua subterránea se encuentra muy somera; la profundidad a los niveles freáticos varía entre menos de 1 m. y unos 15 m. En general, las profundidades mayores se encuentran hacia los bordes laterales del valle, y las menores, en la porción central del mismo.

La posición actual de los niveles freáticos juega un papel importante en el mecanismo de descarga del acuífero; el agua subterránea aflora en el cauce, originando el caudal base del Río Atoyac. Asimismo, es muy probable que en aquellas áreas donde el nivel freático se encuentra a profundidades menores de 3 m. y evoluciona en materiales finos (limo—arcillosos), en los que la altura capilar llega a ser de varios metros, el acuífero esté descargando volúmenes significativos por evapotranspiración. Específicamente, en el área comprendida entre las poblaciones de Zimatlán y Zaachila parece existir esta condición.

CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DEL ACUIFERO

En todo estudio geohidrológico cuantitativo, tendiente a determinar el volumen aprovechable de un acuífero, se requiere del conocimiento de las características hidrodinámicas del mismo, representadas por parámetros; tales como los coeficientes de permeabilidad, transmisibilidad y almacena-

1 9 7 2

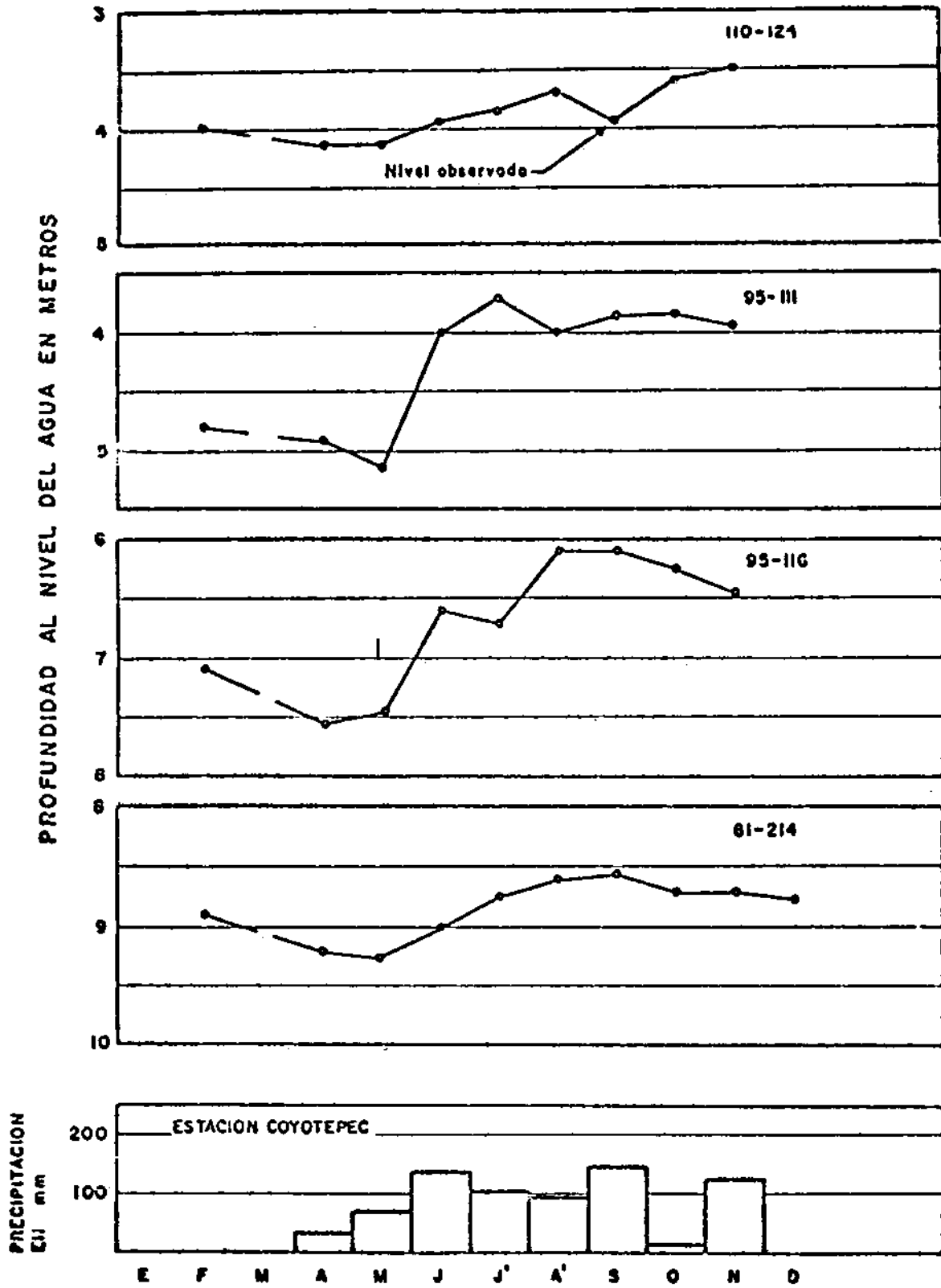


Fig. 7.— Hidrógrafos de pozos de observación seleccionados en el Valle de Zimatlán.

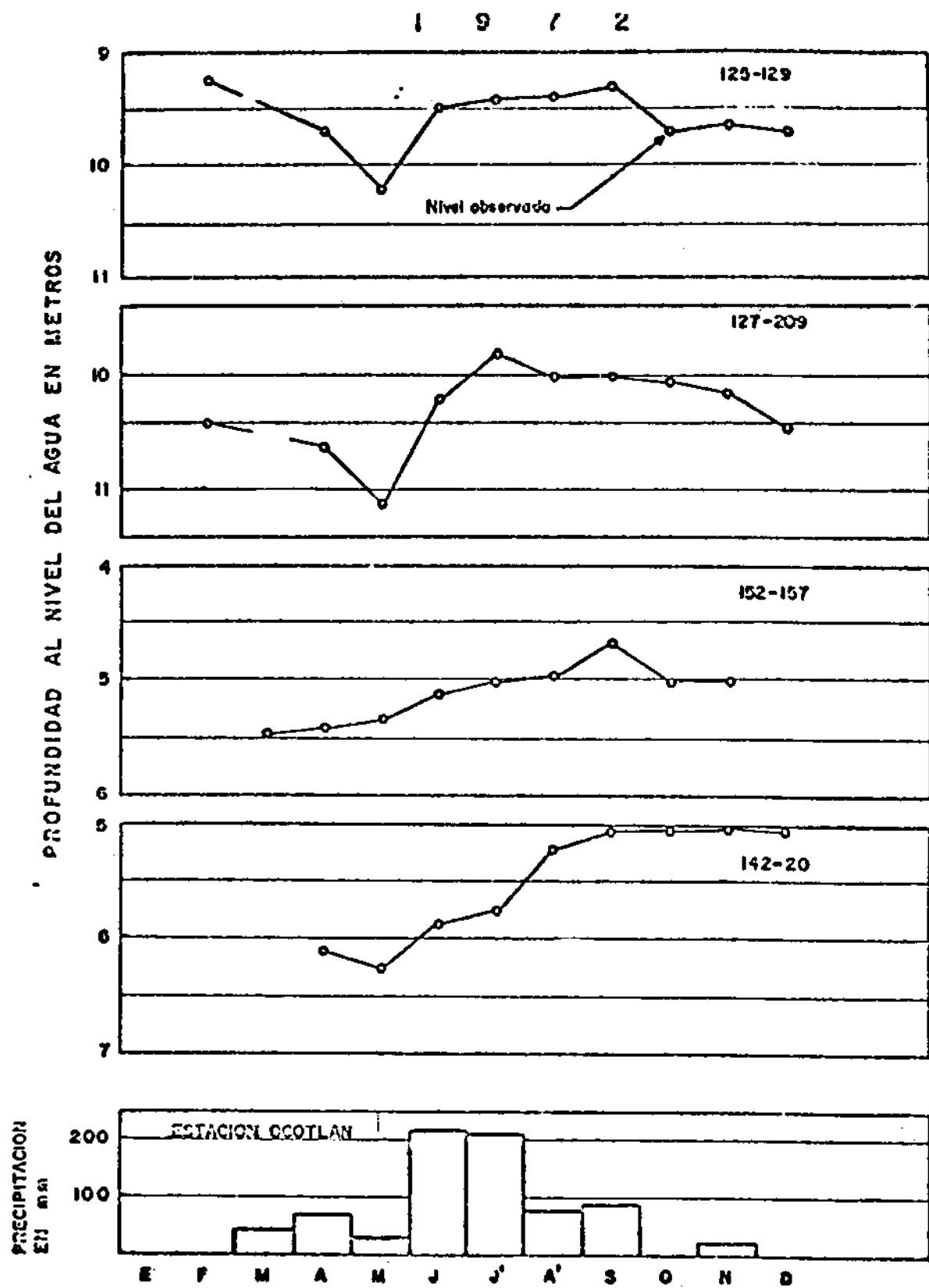


Fig. 8.— Hidrógrafos de pozos de observación seleccionados en el Valle de Zimatlán.

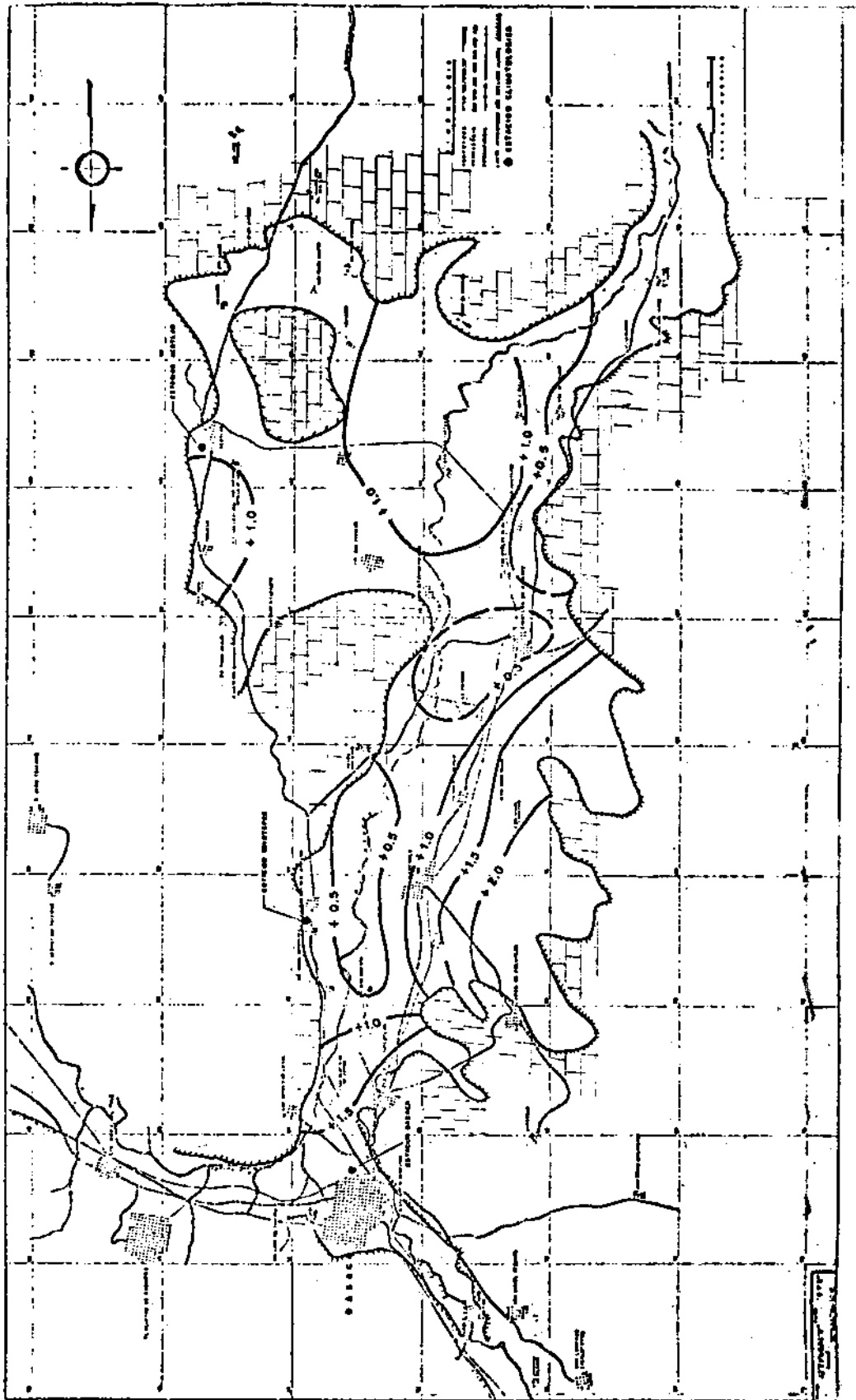


Fig. 9. — Evolución piezométrica marzo—septiembre de 1972.

miento. Estos coeficientes, representativos los dos primeros de la capacidad transmisora del acuífero y el último de su capacidad almacenadora, son obtenidos mediante pruebas de bombeo.

Para la interpretación de las pruebas, se graficaron las observaciones efectuadas durante las etapas de abatimiento y de recuperación, en trazado semilogarítmico. La mayoría de las curvas graficadas reflejan sistemas de flujo complejos. En los primeros minutos de la etapa de abatimiento, las observaciones definen en la gráfica un tramo recto, típico de un sistema de flujo tipo "Theis"; pero después de cierto tiempo de bombeo, la ley de abatimiento se modifica en formas muy variadas.

En la Tabla 1, se resumen los resultados de la interpretación de las pruebas, indicándose la duración de la prueba, el caudal de bombeo, el abatimiento máximo, el caudal específico, la transmisibilidad y la permeabilidad lateral.

Sólo en ocho de las pruebas fue posible deducir la transmisibilidad; en el resto de ellas las observaciones no proporcionan el apoyo suficiente para definir el primer tramo recto con claridad.

Los caudales específicos varían entre 0.2 y 5.6 lps/m.

Las transmisibilidades calculadas resultaron en el rango de 6.8×10^{-5} a 3.2×10^{-2} m²/seg. y las permeabilidades laterales, en el rango de 6.6×10^{-7} a 3.4×10^{-4} m/seg.

Pese a que el número de pruebas interpretables fue reducido, utilizando los caudales específicos y las transmisibilidades en forma complementaria, se encontró cierta concordancia entre los resultados y la litología de acuífero, deducida del muestreo en los pozos de exploración. La gran proporción de materiales arcillosos en el relleno, explica que la transmisibilidad del acuífero sea baja en términos generales; la distribución resultante de transmisibilidades y caudales específicos —valores mayores en la porción central del valle, y decrecientes hacia los bordes del mismo— es compatible con la distribución del espesor y de la granulometría del relleno (ver incisos 3.2 y 3.3).

Las permeabilidades horizontales calculadas deben considerarse como valores medios de toda la

TABLA 1

DATOS DE LAS PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS EN LOS POZOS DE EXPLORACION Y RESULTADOS DE LA INTERPRETACION

POZO	D (Hs)	Q (lps)	a Máx (m)	Q/a Máx (lps/m)	T (m ² /seg)	K _h (m/seg)
POB-4	36	16	30	0.5	No interpretable	
POB-5	36	15	25	0.6	2.2×10^{-4}	0.9×10^{-5}
POB-6	36	155	29	5.5	No interpretable	
POB-7	36	5	32	0.2	6.8×10^{-5}	6.6×10^{-7}
POB-9	36	58	58	1.0	No interpretable	
POB-11	36	92	16	5.6	3.2×10^{-2}	3.38×10^{-4}
POB-12	36	64	13	5.0	No interpretable	
POB-13	36	16	18	0.9	No interpretable	
POB-14	36	70	25	2.8	1.5×10^{-2}	4.7×10^{-4}
POB-15	36	64	47	1.4	2.7×10^{-3}	4.3×10^{-5}
POB-16	36	13	38	0.3	1.4×10^{-4}	3.8×10^{-6}
POB-17	36	11	22	0.5	5.7×10^{-4}	1.0×10^{-5}
POB-19	36	14	21	0.6	4.0×10^{-4}	6.1×10^{-6}
POB-20	36	55	23	2.4	No interpretable	
POB-21	36	26	31	0.8	No interpretable	
POB-22	36	12	18	0.7	2.5×10^{-4}	5.1×10^{-6}
POB-23	36	37	25	1.5	No interpretable	

D=Duración de la prueba; Q=Caudal; a_{máx}=Abatimiento máximo; Q/a_{máx}=Caudal específico; T=Coeficiente de transmisibilidad; K_h=Permeabilidad media horizontal.

sección de relleno, ya que los cedazos se colocaron captando materiales gruesos y finos, indiscriminadamente.

El rendimiento específico de un material es la cantidad de agua drenada bajo la acción de la gravedad, por un volumen unitario de material.

Este parámetro difícilmente puede obtenerse a partir de pruebas de bombeo, debido a que la presencia de lentes de material fino entre el cedazo y el nivel freático disminuye la permeabilidad vertical del acuífero, induciendo un efecto de confinamiento o semi-confinamiento que retrasa la respuesta del nivel freático al bombeo. Este retraso puede llegar a ser tal, que dicho nivel puede permanecer inalterado incluso en una prueba de varios días de duración. Por esta razón, el rendimiento específico sólo puede obtenerse en general, relacionando el cambio de volumen saturado con el volumen de bombeo que lo provoca, en intervalos de tiempo de varios meses de duración en los que la recarga haya sido prácticamente nula.

En un acuífero como el estudiado, el rendimiento específico es de la mayor importancia para estudiar el comportamiento del acuífero a largo plazo (meses o años); en cambio, el coeficiente de almacenamiento sólo tiene importancia en el comportamiento local del acuífero, para tiempos cortos de bombeo.

Desafortunadamente, el rendimiento específico no pudo ser obtenido por el procedimiento descrito, debido a que el bombeo en el valle, muy reducido, no provoca cambios notables en el volumen saturado.

Experiencias con otros acuíferos del mismo tipo y pruebas de laboratorio, han demostrado que el rendimiento específico de los materiales granulares varía en el rango de 0.05 a 0.3, dependiendo de su granulometría; los valores menores corresponden a los materiales finos. Tomando en cuenta que en el valle de Zimatlán los materiales superficiales, en los que evoluciona el nivel freático, son predominantemente finos (arcilla y arena mezcladas en diferentes proporciones), se estima que un valor representativo de su rendimiento específico es 0.1.

CUANTIFICACION DE LA RECARGA DE AGUA SUBTERRANEA

Recarga y Descarga del Acuífero

La recarga al acuífero del valle de Zimatlán tiene lugar por flujo subterráneo y por infiltración en el mismo valle.

La alimentación por flujo subterráneo procede de los valles de Etna y Tlacolula, y entra al valle de Zimatlán por su extremo Norte.

La evolución piezométrica observada durante la temporada de lluvias, indica que la recarga por infiltración ocurre prácticamente en todo el valle, aunque la alimentación más importante tiene lugar a lo largo de su borde Occidental, entre las poblaciones de Zaachila y Zimatlán. Posiblemente, esta alimentación ocurre por la infiltración de los escorrentamientos que descienden de la sierra, en los materiales coluviales y aluviales. Los resultados del estudio geoquímico confirman la importancia de la infiltración en esta porción del valle; asimismo, indican que el Río Atoyac no es una fuente importante de recarga, lo cual se atribuye a que los niveles freáticos someros impiden una alimentación substancial a lo largo del cauce.

La descarga del acuífero tiene lugar por bombeo y por drenado a lo largo del Río Atoyac; en algunas partes del valle es probable que exista también una descarga apreciable por evapotranspiración.

Distribuidos en el valle existen un gran número de aprovechamientos de agua subterránea; la mayoría de ellos son norias poco profundas en las que el agua se extrae con bombas de pequeño diámetro o manualmente. Aunque el volumen de extracción individual es poco significativo, el volumen total explotado en todo el valle es apreciable, debido al gran número de aprovechamientos. Con base en los datos recabados durante el censo, relativos a caudales y tiempos de operación, se ha estimado que el volumen de extracción total en el valle de Zimatlán es del orden de 5 millones de m³/año.

La red de flujo subterráneo indica claramente que la descarga del acuífero al Río Atoyac ocurre

prácticamente a lo largo de todo el valle (ver Fig. 6); el caudal base registrado en las estaciones hidrométricas confirma la existencia de esta descarga y proporciona bases para cuantificarla.

Con respecto a la descarga por evapotranspiración, se mencionó que la reducida profundidad a los niveles freáticos propicia la descarga por evapotranspiración. En particular, en una estrecha faja a lo largo de los cauces y en el área comprendida entre las poblaciones de Zaachila y Zimatlán, la magnitud de esta descarga debe ser considerable.

Balance de Agua Subterránea

La cuantificación de la recarga que recibe un acuífero en un intervalo de tiempo dado, se basa en un principio universal: el principio de conservación de la masa. Este principio, aplicado a un acuífero, puede expresarse: la diferencia que existe entre los volúmenes de recarga y descarga de un acuífero, en un intervalo de tiempo dado, es igual al cambio en almacenamiento que experimenta el acuífero en el mismo intervalo. A la ecuación que expresa matemáticamente lo anterior, se le denomina "ecuación de balance de agua subterránea".

Tomando en cuenta los mecanismos de recarga y descarga descritos en el inciso anterior, la ecuación de balance para el acuífero del valle de Zimatlán, es:

$$E_h + R - D - B - E_v = \pm V$$

en la que E_h es el volumen de entrada por flujo subterráneo; R , el volumen infiltrado en el valle; D , la descarga del acuífero al Río Atoyac; B , el volumen extraído por bombeo; E_v , el volumen descargado por evapotranspiración, y V es el cambio de almacenamiento experimentado por el acuífero; correspondiendo todos los volúmenes al mismo intervalo de tiempo.

Los resultados del balance de agua subterránea pueden resumirse como sigue. La recarga del acuífero en el intervalo analizado fue de unos 40 millones de m^3 ; unos 35 millones procedieron de la infiltración de la precipitación en el valle, y unos 5

millones entraron al valle subterráneamente por su extremo norte. La descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración, estimándose que un volumen de unos 25 millones de m^3 se perdieron por este concepto en el ciclo analizado; otras descargas son el bombeo, estimado en 5 millones de m^3 , y la que tiene lugar a lo largo del Río Atoyac, cuyo orden de magnitud es de 1 millón de m^3 . El volumen almacenado se incrementó en unos 9 millones de m^3 , a consecuencia del ascenso de los niveles freáticos.

Debe tomarse en cuenta, sin embargo, que la recarga de un acuífero puede variar notablemente de un año a otro, dependiendo principalmente de la precipitación. Por ello, la recarga deducida del análisis de un solo ciclo anual es poco significativa, y debe tenderse más bien a la estimación de una recarga media anual.

La comparación de la precipitación ocurrida en el ciclo analizado, con la precipitación media anual de un intervalo de varios años, en el que estén incluidos tantos años secos como años lluviosos, es un criterio útil para definir cómo es la recarga calculada con respecto a la media anual. Cabe aclarar que este criterio no es totalmente adecuado, pues la infiltración depende más bien de la intensidad de lluvia que del volumen total precipitado; no obstante, el criterio es suficientemente bueno para efectos prácticos.

Como puede apreciarse en la Fig 3, la precipitación ocurrida en 1972 fue muy próxima a la media anual del intervalo 1962-1972; por consiguiente, la recarga calculada para dicho año puede considerarse como representativa de la recarga media anual. Esto deberá ser verificado posteriormente, cuando se disponga de la información que permita plantear un balance de agua subterránea para un intervalo de varios años.

RECOMENDACIONES PARA EXPLORACION FUTURA

Con base en los resultados del balance de agua subterránea en la información hidrológica y geológica disponible, se hacen las recomendaciones siguientes para la explotación del acuífero del valle de Zimatlán.

Volumen Inicial de Explotación

Del balance de agua subterránea se concluyó que la recarga total al acuífero del valle de Zimatlán, es del orden de 40 millones de $m^3/año$. Sólo una parte de este volumen renovable —unos 5 millones de m^3 —, es aprovechado actualmente; la mayor parte del volumen restante es descargado por el acuífero en forma natural, por evapotranspiración principalmente. Lo anterior sugiere la conveniencia de incrementar el volumen de extracción en unos 30 a 35 millones de $m^3/año$, para modificar el mecanismo de descarga del acuífero; de tal manera que el volumen descargado a la atmósfera sea disminuido o anulado, mediante el abatimiento de los niveles freáticos. Sin embargo, hay factores limitantes que deben tomarse en cuenta.

El más importante de ellos es la estratigrafía del relleno aluvial. Como se indicó anteriormente, el relleno está constituido por intercalaciones de capas de materiales de granulometría diferente y, por tanto, de permeabilidad diferente, encontrándose en gran parte del valle los materiales gruesos cubiertos por una capa de material de menor tamaño. En estas condiciones geológicas el bombeo de un pozo provoca, en una misma vertical, abatimientos diferentes en cada capa (aun cuando el cedazo del pozo las capte a todas); los mayores abatimientos se presentan en las capas más permeables, y las capas de menor permeabilidad drenan verticalmente hacia las primeras. Si el nivel freático evoluciona en los materiales de menor permeabilidad relativa, su abatimiento se retrasa con respecto al ocurrido en las capas más permeables; este retraso es directamente proporcional al espesor de aquellos e inversamente proporcional a su permeabilidad.

Debido a lo anterior, podría ocurrir que el bombeo provocara abatimientos de gran magnitud en los estratos permeables inferiores, mientras los niveles freáticos permanecen casi inalterados o se abaten a un ritmo mucho menor.

Otros factores limitantes son la baja transmisibilidad del acuífero y su gran heterogeneidad, los cuales reducen el área aprovechable para distribuir la explotación, ya que en aquellas zonas donde la

transmisibilidad es muy baja, los pozos proporcionarían caudales muy reducidos con abatimientos demasiado fuertes; además, la influencia del bombeo en el abatimiento de los niveles freáticos sería muy local.

Como puede verse, los factores mencionados reducen la posibilidad de aprovechar en su totalidad el volumen renovable. Por esta razón, se recomienda iniciar la explotación del acuífero con un volumen del orden de 25 millones de $m^3/año$, mediante pozos distribuidos en las áreas señaladas en el inciso siguiente. Según los efectos provocados por esta primera etapa de explotación, se definiría la conveniencia de incrementar aún más el bombeo.

Áreas Recomendadas para la Explotación

En la Fig. 10, se muestra la localización de las áreas recomendadas para distribuir el bombeo, las cuales fueron seleccionadas atendiendo a la transmisibilidad del acuífero.

En dichas áreas el espesor saturado varía entre 40 y 100 m. y la profundidad al nivel freático, entre 4 y 8 m.

La explotación puede iniciarse de inmediato, equipando los pozos de exploración ubicados dentro de estas áreas; el caudal total que pueden proporcionar estos pozos es del orden de 700 lps.

Se recomienda que los pozos nuevos capten todo el espesor de relleno; asimismo, que cada uno de ellos sea diseñado con base en su corte geológico y registro eléctrico, así como en toda la información que se recolecte durante su perforación. Si los pozos son debidamente perforados, diseñados y desarrollados, pueden esperarse en promedio, caudales específicos entre 1 y 6 lps/m. aunque dada la heterogeneidad del acuífero es posible que en algunos pozos los rendimientos sean notablemente diferentes.

Es importante señalar que aun cuando se tengan pozos que proporcionen caudales hasta de 100 lps. o más, con abatimientos relativamente reducidos, puede no ser conveniente operarlos a su caudal máximo, ya que desde el punto de vista geohidroló-

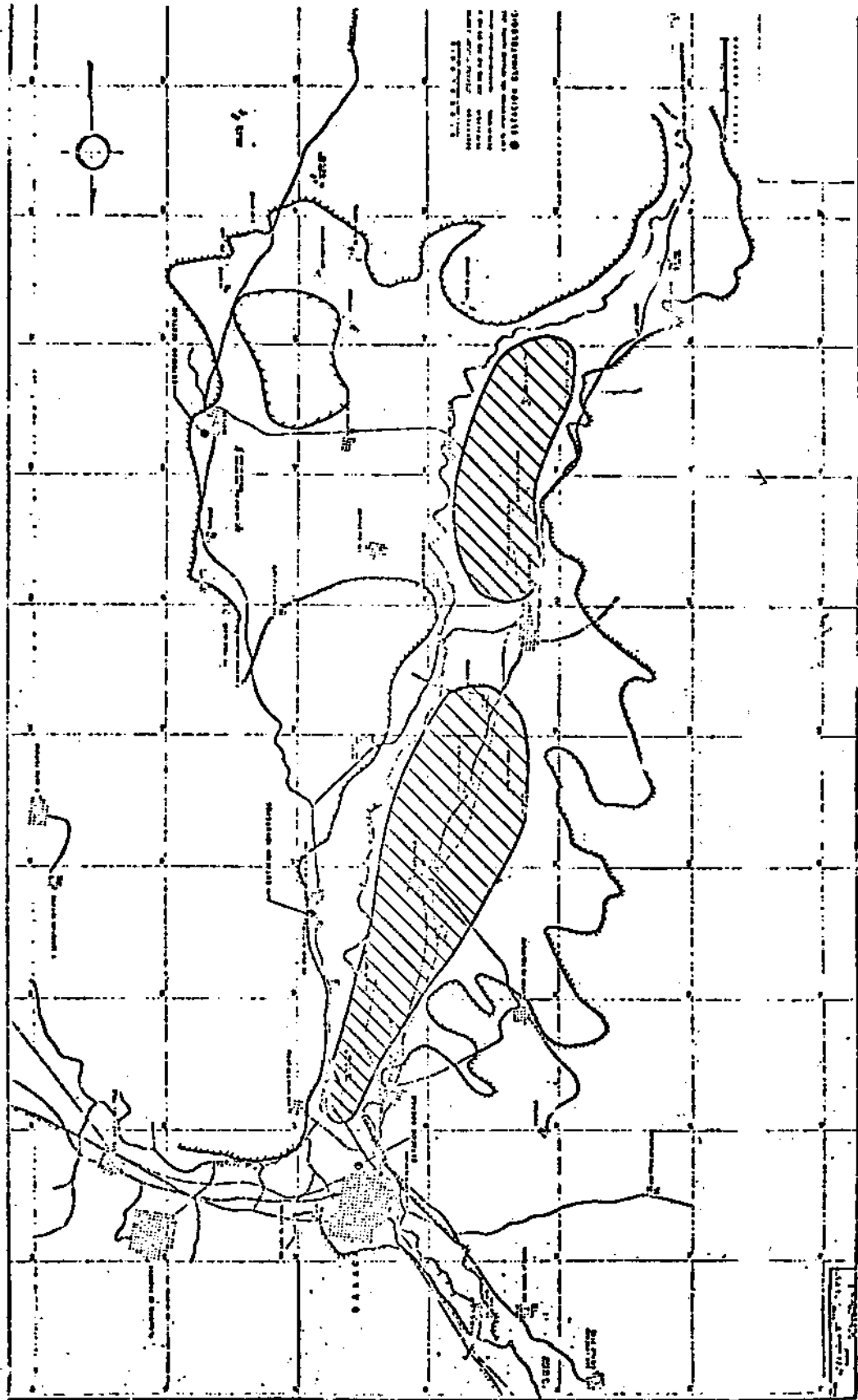


Fig. 10.— Areas recomendadas para explotación de agua subterránea.

gico es preferible distribuir el bombeo en un área lo mayor posible, a concentrarlo en unos cuantos pozos.

Las exploraciones realizadas en la porción Suroriental del valle, mostraron condiciones desfavorables para la explotación por el predominio de materiales arcillosos. Por esta razón, no se ha recomendado la construcción de pozos de explotación en esta área. No obstante, ésta no debe descartarse del todo sin antes realizar algunas exploraciones adicionales. Por otra parte, aun cuando los pozos sean de bajo rendimiento, podrían utilizarse para riego de pequeñas áreas.

Efectos Inducidos por la Explotación

Son varios los efectos que inducirá el incre-

mento de la explotación. El efecto inmediato será el abatimiento de los niveles piezométricos del acuífero. A su vez, este efecto inducirá otros; el drenado vertical del área, la reducción de las pérdidas por evapotranspiración y la intercepción del flujo subterráneo que descarga al Río Atoyac. Como ya se mencionó, en algunas partes del valle la ocurrencia de estos últimos puede retrasarse con respecto a la ocurrencia del primero.

Otro efecto que se inducirá, a consecuencia del abatimiento de los niveles freáticos en las proximidades del río, es un incremento de la recarga por infiltración a lo largo del cauce durante la temporada de lluvias. En esta forma se aprovechará también, aunque sea en una mínima parte, el escurrimiento superficial que actualmente escapa del valle.

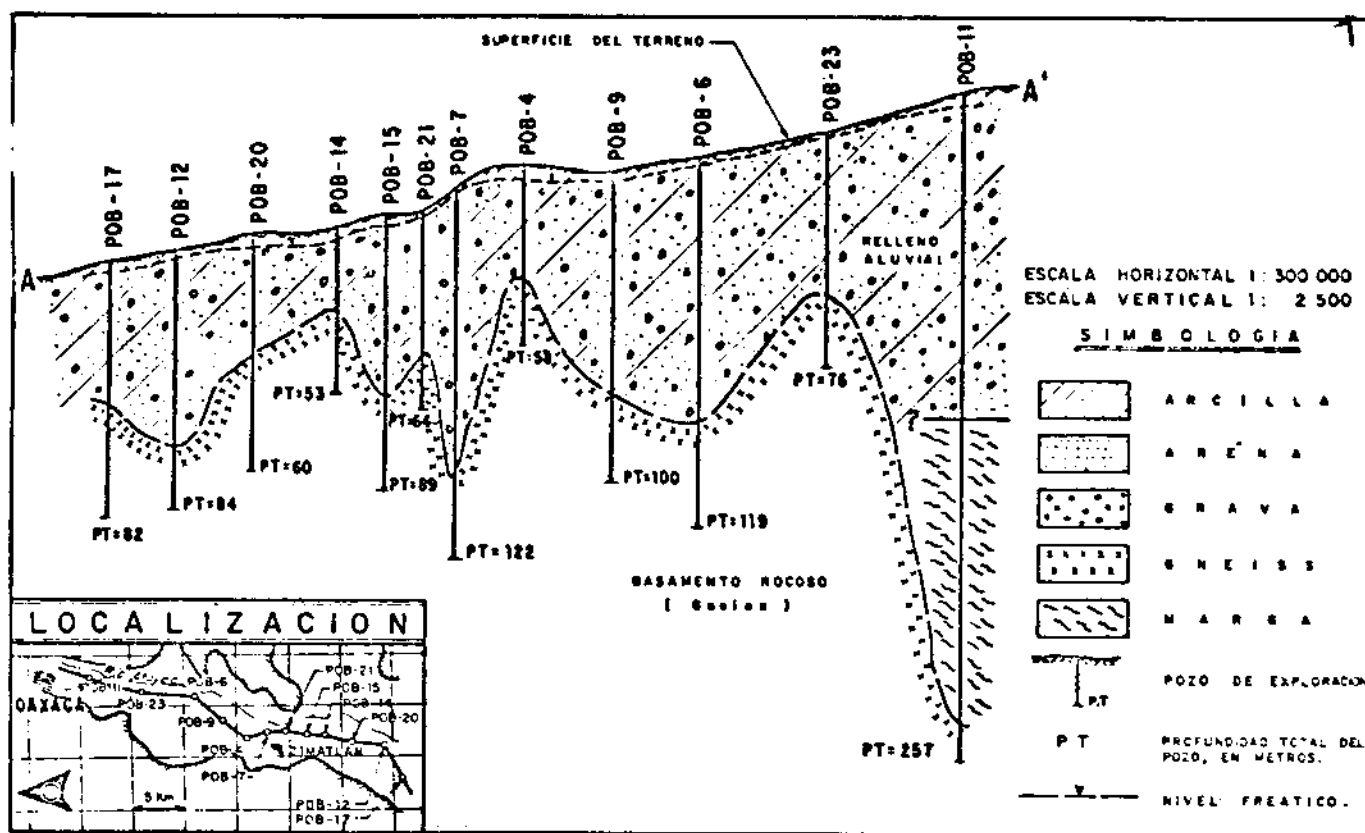


Fig. 11.— Sección geológica longitudinal.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del procesamiento e interpretación de la información disponible, se derivan las conclusiones siguientes:

- El acuífero del valle de Zimatlán está constituido por rellenos aluviales, arenas y gravas, mezcladas con materiales arcillosos en proporciones muy variables.

Es muy heterogéneo debido a la gran variación de su litología y de su espesor; este último varía entre 10 y 110 m., los mayores espesores se encuentran en la porción central del valle, y los menores en los bordes del mismo. Está limitado inferior y lateralmente por rocas metamórficas principalmente.

- b). El Río Atoyac es la corriente más importante del valle de Zimatlán. Funciona como un drene del acuífero, del cual recibe un volumen anual estimado en 1 millón de m^3 . En el intervalo marzo 1972, abril 1973; el volumen total de escurrimiento que salió del valle por su extremo Sur, fue de 87.5 millones de m^3 . En el mismo intervalo recibió el Río Etlá (valle de Etlá) una aportación de 45.6 millones de m^3 , y del Río Salado (valle de Tlacolula), una aportación de 32.2 millones de m^3 .
- c). El agua subterránea es de muy buena calidad, su salinidad total varía entre 200 y 600 ppm. La variación en el área de la salinidad y de algunos contenidos iónicos, indica que la alimentación más importante del acuífero ocurre en su porción Noroccidental. No fue posible definir con la información hidrogeológica disponible, si la descarga de aguas negras de la Ciudad de Oaxaca tiene alguna influencia en la calidad del agua subterránea, en la porción Norte del valle.
- d). El flujo subterráneo entra al valle de Zimatlán por su extremo Norte a través del estrechamiento que lo comunica con los valles de Etlá y Tlacolula. Su dirección predominante es de Norte a Sur. La configuración piezométrica señala que la alimentación más importante procede del borde Noroccidental del valle; asimismo, muestra que el río funciona como un drene del acuífero.
- e). Los niveles del agua subterránea se encuentran a profundidades entre menos de 1 m. y unos 15 m.; en términos generales, esta profundidad aumenta del centro hacia los bordes del valle.

- f). La transmisibilidad del acuífero es baja, debido a la abundancia de materiales arcillosos, y muy variable en el área. En general, es mayor en la porción central del valle y decrece hacia los bordes del mismo. Los caudales específicos varían entre menos de 0.2 y 5.6 lps/m.
- g). La recarga al acuífero tiene lugar por flujo subterráneo procedente de los valles altos, y por infiltración en el valle. La recarga total del acuífero en el año de 1972, fue del orden de 40 millones de m^3 ; unos 35 millones de m^3 se originaron por infiltración en el valle, y unos 5 millones de m^3 entraron al valle por flujo subterráneo proveniente de los valles altos.
- h). La descarga del acuífero ocurre principalmente por evapotranspiración, estimándose que un volumen de unos 25 millones de m^3 se perdió por este concepto en el ciclo analizado. Otras descargas son el bombeo, estimado en unos 5 millones de m^3 , y la que tiene lugar a lo largo del Río Atoyac, cuyo orden de magnitud es de 1 millón de m^3 /año.

En una primera etapa, es posible incrementar la explotación del acuífero en unos 25 millones de m^3 /año, mediante pozos distribuidos en las áreas recomendadas. Para ello, pueden equiparse los pozos de explotación localizados en dichas áreas, los cuales proporcionan un caudal total del orden de 700 lps. La observación continua de los efectos que este incremento provoque, proporcionará bases para definir si es conveniente incrementar aun más el volumen de extracción.

El incremento de la explotación inducirá varios efectos. El efecto inmediato será el abatimiento de los niveles piezométricos en las capas más permeables. A su vez, este efecto inducirá el abatimiento de los niveles freáticos, con la consiguiente intercepción del volumen descargado al río y la disminución gradual de las pérdidas por evapotranspiración. Asimismo, se propiciará una mayor descarga por infiltración a lo largo del cauce durante la temporada de lluvias.