

19
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“SIMULACION NUMERICA DE FLUJO BIDIMENSIONAL
DEL ACUIFERO DE SAN QUINTIN, B. C.”**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO GEOLOGO

P R E S E N T A :

RAUL MEJIA VAZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:

M. C. RUBEN MARTINEZ GUERRA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

pagina

I.- INTRODUCCION.....	1
I.1 - Antecedentes.....	3
I.2 - Objetivo del estudio.....	5
I.3 - Metodologia.....	5
II.- HIDROGEOLOGIA.....	8
II.1 - Climatologia.....	8
II.2 - Marco geologico.....	12
II.2.1 - Fisiografia.....	12
II.2.2 - Geologia.....	12
II.2.3 - Geologia Historica.....	13
II.2.4 - Unidades hidrogeologicas.....	17
II.3 - Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeologico... ..	18
III.- HIDROLOGIA SUBTERRANEA.....	22
III.1 - Hidrometria de aprovechamientos.....	22
III.2 - Piezometria.....	24
III.3 - Coeficientes hidrodinamicos.....	24
IV.- SIMULACION DEL ACUIFERO.....	29
IV.1 - Fundamentacion matematica de la simulacion.....	29
IV.2 - Discretizacion del acuífero.....	35
IV.3 - Condiciones iniciales.....	36
IV.4 - Condiciones de contorno.....	39
V.- FORMULACION FISICA DE LA SIMULACION.....	40
V.1 - Programa utilizado.....	40
V.2 - Geometria del sistema acuífero.....	41
V.3 - Distribucion de parametros.....	43
VI.- CALIBRACION DE LA SIMULACION.....	47
VI.1 - Generalidades.....	47
VI.2 - Estado de la calibracion.....	49
VII.- OPERACION DE LA SIMULACION.....	60
VII.1 - Alternativas de explotacion.....	60
VII.2 - Simulacion del acuífero.....	63
VII.3 - Consideraciones finales.....	68
VII.4 - Discusion de resultados.....	69
VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFIA.....	80

INDICE DE FIGURAS

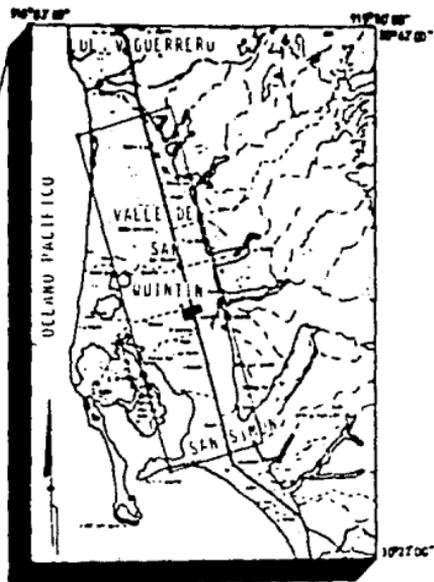
LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	I-1
ISOYETAS E ISOTERMAS	II-1
PRECIPITACION MENSUAL (1976-1988)	II-2
PRECIPITACION ANUAL (1949-1985)	II-3
CINTURONES GEOLOGICOS PRETERCIARIOS	II-4
BLOQUE DIAGRAMATICO DEL JURASICO SUPERIOR	II-5
PLANO HIDROGEOLOGICO	II-6
ISOSALINIDAD, 3000 PPM	II-7
VOLUMEN DE EXTRACCION	III-1
INCREMENTO DE APROVECHAMIENTOS	III-2
SECCION HIDROGEOLOGICA	III-3
CONDICIONES INICIALES	III-4
ISOTRANSMISIVIDAD	III-5
MODO INTERIOR DE UNA MALLA TIPO	IV-1
DISCRETIZACION DEL ACUIFERO	IV-2
SIMULACION DE CONDICIONES INICIALES ESTABLES	IV-3
ELEVACION DE LA BASE ACUIFERA	V-1
VOLUMEN DE EXTRACCION ZONA DE SAN QUINTIN	V-2
INCREMENTO DE POZOS ZONA DE SAN QUINTIN	V-3
VOLUMEN DE EXTRACCION VALLE DE SAN SIMON	V-4
INCREMENTO DE APROVECHAMIENTOS, VALLE DE SAN SIMON	V-5
ISOTRANSMISIVIDADES CALIBRADAS	VI-1
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA CALIBRADA	VI-2
SIMULACION DE CONDICIONES INICIALES CON BOMBEO DE 1971	VI-3
CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO, 1971	VI-4
SIMULACION DE CONDICIONES INICIALES CON BOMBEO DE 1978	VI-5
CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO, DIC. 1977	VI-6
SIMULACION DE CONDICIONES INICIALES CON BOMBEO DE 1985	VI-7
CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO, FEB. 1988	VI-8
SIMULACION DE DIC. 1977 A FEB. 1981	VI-9
CURVAS DE IGUAL ELEVACION DE FEB. 1981	VI-10
SIMULACION DE LA ALTERNATIVA 1	VII-1
SIMULACION DE LA ALTERNATIVA 2	VII-2
SIMULACION DE LA ALTERNATIVA 3	VII-3
RESULTADOS DE LA COLUMNA 4	VII-4
RESULTADOS DE LA COLUMNA 10	VII-5
RESULTADOS DE LA COLUMNA 16	VII-6

I. INTRODUCCION.

Desde hace tiempo el valle de San Quintin es uno de los principales productores agrícolas del Estado de Baja California, desarrollado con base en la utilización del agua subterránea que se empezó a explotar desde 1940. Sin embargo, en las últimas décadas el gran incremento de los aprovechamientos, cuya explotación rebasa la capacidad renovable del acuífero, ha provocado un cono de abatimiento cuya elevación se encuentra bajo el nivel medio del mar. Esta condición crea un gradiente hidráulico que favorece la intrusión marina, deteriorando la calidad del agua subterránea y limitando su utilización.

Los recursos hidráulicos superficiales son prácticamente nulos, dado que en la Península de Baja California se presentan condiciones climáticas desfavorables, con una escasa precipitación pluvial, por lo que el agua subterránea cobra una vital importancia. De aquí, la necesidad de conocer con mayor precisión el funcionamiento del acuífero, y una forma de lograrlo es mediante un modelo matemático que permita simular su comportamiento, y de esta forma plantear posibles alternativas que ayuden a conservar los recursos hídricos subterráneos.

El área de estudio está ubicada en la porción centro oriental del Estado de Baja California, cuya cuenca tiene una superficie de 2590 km², de la cual 244 km² forman una planicie costera denominada valle de San Quintin, limitada por las coordenadas 30°22'00"-30°42'00" de latitud norte y 115°50'00"-116°02'30" de longitud oeste. (Fig. I-1)



G E O L O G I A	FACULTAD DE INGENIERIA	UN AM
	TESIS PROFESIONAL	
	SIMULACION NUMERICA DE FLUJO BIDIMENSIONAL	
	DEL ACUIFERO DE SAN QUINTIN, B. C.	
	LOCALIZACION	
	Figura I-1	Raúl Mejía Vázquez 1990

I.4 Antecedentes

Para el año de 1971, la Compañía INGESA realizó un estudio geohidrológico, determinando para este tiempo la existencia de 415 aprovechamientos, de los cuales 227 estaban activos y solamente 177 pozos equipados, operando la mayoría con caudales inferiores a 10 lps. La extracción estimada fue de $25 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y los niveles estáticos se encontraban ya bajo el nivel del mar hasta 12 m. en el área comprendida entre la mesa de Agua Chiquita y la mesa de San Ramón, cerca de los pozos 91 y 95. Solamente al norte y al sur se apreciaban zonas con niveles estáticos sobre el nivel medio del mar.

La compañía TMI,SA realizó el estudio de actualización de condiciones geohidrológicas en 1974, el cual reporta que se tenían 245 aprovechamientos que extraían 45 Mm^3 , manifestándose los efectos de la sobreexplotación por la ampliación del cono de abatimiento. Con la información hasta esa fecha se calculó una recarga de $33 \text{ Mm}^3/\text{año}$, siendo entonces la sobreexplotación de $12 \text{ Mm}^3/\text{año}$. La isolínea de 3000 ppm ya estaba presente dentro del continente, en algunas zonas a lo largo de la costa. Esta misma compañía llevó a cabo un estudio geofísico, donde se planteó la existencia de una barrera impermeable arcillosa paralela a la línea de costa y también dos paleocauces al norte y sur del valle, en donde la salinidad se manifestó mayor, la extracción se calculó en $40 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

En 1978 la compañía ICO,S.A. elaboró el diagnóstico de las condiciones geohidrológicas, reportando 664 aprovechamientos, cuya extracción era de $26 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y recarga de $15 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Esto da una sobreexplotación de $11 \text{ Mm}^3/\text{año}$. La elevación del nivel estático era de -14 m en el cono de abatimiento. La calidad del agua ya indicaba valores máximos de 10,000 ppm en la parte sur del valle; en el norte y paralelo a la línea de costa se tenían valores de 5000 ppm, pues la isolínea de 3000 ppm se encontraba en promedio 3.5 km a partir de la línea de costa.

La Residencia General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos de Ensenada, B.C., en 1988 efectuó el informe de condiciones geohidrológicas, en donde se reportan 792 obras con extracción anual de $54 \text{ Mm}^3/\text{año}$, recarga de $33 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (basados en TMI, S.A., 1974), dando una sobreexplotación de 21 Mm^3 . Los niveles estáticos se encontraron 9 m bajo el nivel del mar en el centro del cono de abatimiento. La isolínea de 3000 ppm se encontraba en promedio 5 Km dentro del continente a partir de la línea de costa.

En 1988 la compañía ICR, S.A. reporta un volumen de extracción de $48 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y salinidades que varían de 1000 a 10,000 ppm, la isolínea de 3000 ppm sigue avanzando tierra adentro y las elevaciones del N.E. fueron de -10 m en el centro del cono de abatimiento.

De la información analizada se puede observar que el cono de abatimiento que existe desde 1971, con elevaciones de 10 m bajo el nivel del mar, ha propiciado el avance de la intrusión marina, ocasionando el deterioro de la calidad del agua subterránea, limitando seriamente la utilización para cualquier uso, sobre todo el agrícola. Es conocido en la actualidad el abandono de pozos a lo largo de la línea de costa por el alto contenido de sales del agua subterránea.

Se puede concluir que si el acuífero continúa explotándose con la misma intensidad, el avance de la salinidad aumentará cada vez con mayor rapidez, debido a la influencia que ejerce el cono de abatimiento en el flujo subterráneo.

En caso de disminuir la explotación actual en un 50%, la respuesta del acuífero podría ser la recuperación parcial del cono original. En consecuencia el avance de la salinidad tenderá a disminuir, sin embargo, los valores de mineralización presentes en las zonas afectadas ya no disminuirán en tanto no exista una recuperación total del acuífero, y esto desde el punto de vista económico no es posible, porque significa dejar de explotar el acuífero.

1.2 Objetivo

De lo anterior se desprende la necesidad de realizar un modelo matemático, cuyo objetivo es el de analizar el comportamiento del acuífero ante diversas alternativas de explotación, con la finalidad de buscar la recuperación parcial del mismo y evitar que continúe el deterioro provocado por la intrusión marina.

1.3 Metodología

Para el planteamiento de la simulación se requiere recabar información acerca de las características del acuífero, conocer la geometría, extensión, fronteras y su espesor, así como sus características físicas de transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Para calibrar el modelo se necesita su historia piezométrica, y los regímenes de extracción y alimentación para un mismo periodo. Para obtenerlos es indispensable contar con información geológica, geofísica, de hidrología subterránea y superficial y las condiciones de explotación.

En general no se tiene una metodología para la realización de una simulación numérica, porque cada acuífero tiene condiciones diferentes de funcionamiento. Es necesario seleccionar el modelo matemático que más se ajuste a las características del sistema a modelar, pues en algunos casos se deben hacer modificaciones a los programas de computación para obtener resultados satisfactorios, y cuando el sistema es muy complejo, se debe desarrollar desde la fundamentación matemática hasta la realización del programa de computación para simular.

Para el caso del valle de San Quintín se utilizó un modelo matemático de flujo bidimensional denominado "PLASMER4", que es una versión para microcomputadoras del modelo desarrollado por Prickett

T.A. (1971), el cual tiene algunas limitantes, como el tamaño de la malla a simular de 27 x 27 nodos, esto se debe a la capacidad de memoria de las microcomputadoras. Sin embargo, es bastante completo y versátil, por lo que se utilizó sin hacer modificaciones al programa fuente, y en algunos casos se adecuaron las condiciones del acuífero a los parámetros que requiere el programa. En realidad el acuífero de San Quintín requiere de un modelo matemático que simule intrusión marina, sin embargo, es necesario hacer primero un modelo de flujo y una vez calibrado se puede continuar con un modelo de intrusión salina, que en esencia es más complejo.

Es importante señalar que en este trabajo se utilizó sólo información recabada de los diversos estudios, ya que no se realizó trabajo de campo para poder complementarla. No obstante, la información existente es bastante completa y confiable, por lo que fue posible realizar el trabajo, y como sucede en la mayoría de los acuíferos, existen zonas con poca o ninguna información. En este caso se simuló bajo estas condiciones. Sin embargo, es necesario en un futuro realizar pruebas de bombeo y ampliar el área cubierta por los sondeos geofísicos, etc., para conocer con mayor precisión los parámetros del acuífero.

La metodología empleada en este trabajo, fue en primer lugar, revisar los parámetros que requiere el programa, ver cuáles son las limitantes y alcances, la forma en que hay que alimentar los datos y como modificarlos posteriormente. En segundo lugar, se recopiló toda la información para identificar el área a modelar, plasmarla en planos y en unidades consistentes; además se diseñó una malla, ajustándola a los límites del acuífero y se obtuvieron todos los parámetros para cada nodo. Posteriormente se capturó la información y se realizaron diversas corridas. Para la calibración se modificaron los parámetros por pasos; primero se hicieron modificaciones preliminares simulando condiciones iniciales con variación de bombeo, posteriormente se hicieron las modificaciones necesarias para lograr una calibración

simulando con cargas hidráulicas, recarga y bombeo conocidos.

Se realizó una simulación de condiciones iniciales, con recarga y un coeficiente de almacenamiento muy pequeño ($1E-15$), para simular condiciones en régimen establecido, este método permite calibrar la conductividad hidráulica y la recarga, ya que el coeficiente de almacenamiento tiende a cero; posteriormente en régimen transitorio se calibra el coeficiente de almacenamiento y la recarga, sin embargo, en este caso se simuló al final de la calibración para corroborar la confiabilidad de los parámetros y finalmente se simularon diversas alternativas de explotación considerando una recarga media anual.

II.- HIDROGEOLOGIA.

La hidrogeología como rama de la ciencia estudia los fenómenos y leyes de la circulación del agua en la naturaleza. Para investigar el origen de esta agua se necesita tomar en cuenta los fenómenos climáticos, y a su vez, el marco geológico es indispensable para comprender el movimiento a través del subsuelo.

II.1 CLIMATOLOGIA

Se contó con información de 7 estaciones climatológicas, cuyos resultados se presentan en la tabla II-A, con los que se configuraron las isoyetas e isoterms que se presentan en la (fig II-1). Desafortunadamente la estación "Rósarito de San Pedro Mártir" fue suspendida en 1974, por lo que no fue posible cubrir toda la cuenca con esta información, no obstante, se puede observar que la precipitación media anual varía de 200 a 300 mm y probablemente llegue a 500 mm en las partes más altas, además la precipitación tiene una relación directa con la topografía, por lo que se infirieron las isoyetas con el fin de tener una aproximación de distribución de la lluvia. La temperatura media anual varía de 16 a 18 °C, y el clima es en general templado muy seco.

La estación Climatológica "Las Escobas" es la representativa del valle de San Quintín. Se calculó la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite, que toma en cuenta la temperatura y precipitación mensual, se construyó una gráfica (fig II-2), en donde se presenta la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial mensual. Sin hacer un análisis estricto, se puede inferir que los años cuya precipitación sea igual o mayor a la media anual (146mm) (fig II-3), son los años en que se presentan excedentes de agua que probablemente lleguen a infiltrarse. En los demás años sólo en los arroyos puede existir infiltración de los escurrimientos de las lluvias torrenciales.

PRECIPITACION Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL

NUM	ESTACION	PERIODO	TEMP. OC	PREC. mm
1	Las Escobas	1969-87	16.0	146
3	Sta. Cruz	1970-87	17.8	358
4	Sto Domingo	1963-87	18.0	258
5	Colonia Vicente Gro.	1970-87	15.8	196
8	Rosarito de San Pedro Martir (incompleta y suspendida 1974)			
9	Sta. Ma. del Mar	1970-87	17.2	182
10	El Socorro	1970-87	16.0	135

TABLA II. A

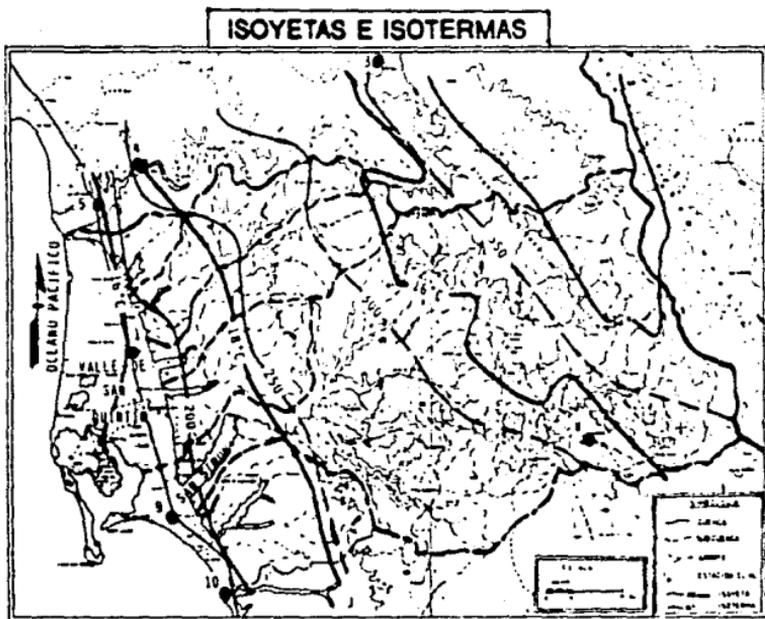


FIG. II-1

EVAPOTRANSPIRACION MENSUAL ESTACION LAS ESCOBAS

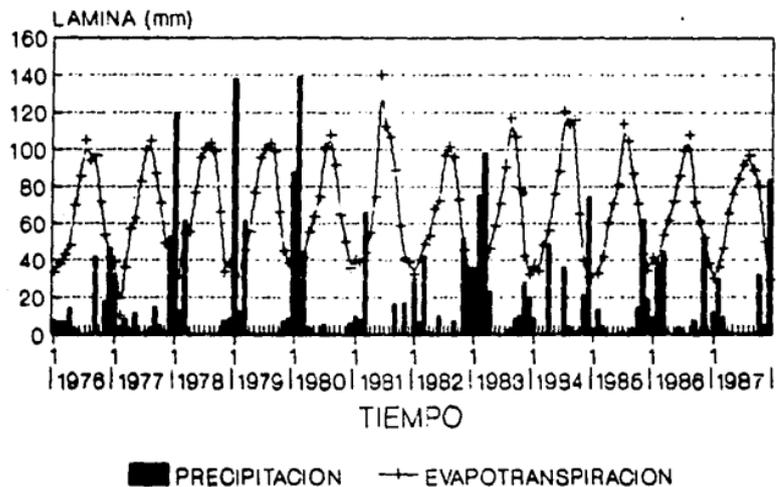


FIG. II-2

PRECIPITACION ANUAL LAS ESCOBAS, SAN QUINTIN

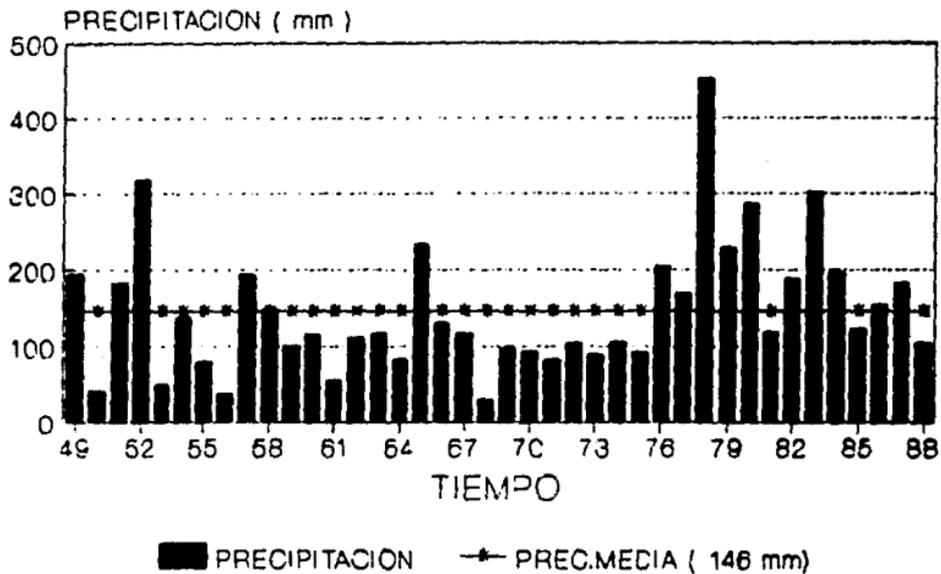


FIG. II-3

II.2 MARCO GEOLOGICO.

No cualquier roca tiene la propiedad para acumular y conducir el agua, por lo que es indispensable conocer el marco geológico para comprender el comportamiento del agua subterránea y definir las características geométricas del acuífero.

II.2.1 Fisiografía.

El área de estudio queda comprendida en la provincia de Baja California. Debido a las estructuras y topografía, así como el tipo de roca, presenta drenaje de tipo dendrítico semiparalelo con dirección hacia la costa del Océano Pacífico. Se tienen dos subcuencas, la primera la forman pequeñas corrientes, así como los arroyos de Padre Kino, La Escopeta, Las Palomas y Agua Chiquita, que en total tienen un área de 946 Km², la segunda la conforma el arroyo San Simón, que tiene una extensión de 1644 Km². En total son 2590 Km² de cuenca, de los cuales 244 Km² pertenecen al acuífero de San Quintín.

Las geoformas son fundamentalmente de tres tipos: Planicie costera, al poniente de la cuenca, es donde se localiza el acuífero; al oriente se tienen mesetas escalonadas disectadas por las corrientes; y las partes altas están conformadas por la sierra San Miguel, 1500 msnm, y la sierra de San Pedro Mártir, con altura de 2100 msnm. Además se observa el desarrollo de tómbolos y de barras al suroeste, que unen a unos volcanes recientes que originalmente formaban pequeñas islas.

II.2.2. Geología.

En las partes altas se encuentran grandes cuerpos de rocas ígneas intrusivas de tipo ácido, granodiorita y tonalita del Cretácico inferior, así como unidades metamórficas, gneis y metasedimentarias

que afloran en la sierra de San Pedro Martir. La mayor parte de la cuenca esta compuesta por rocas igneas extrusivas Acidas y tobas riolíticas.

Las mesetas y lomas que rodean a la planicie, al oriente, estan constituidas por un conglomerado heterogéneo formado de fragmentos de granito, basalto y caliza metamorfizada dentro de un cementante arcilloarenoso.

El valle es una planicie suave formada por una antigua terraza, donde se depositaron grandes espesores de materiales granulares, originados por la erosión de las sierras. En su porción occidental esta planicie esta interrumpida por aparatos volcánicos cuaternarios.

Los batolitos del área y la secuencia ignea extrusiva, aparecen cortados por fracturas y por fallas normales de orientación general norte-sur. También la mesa de San Simón, al sureste del valle, presenta una falla de tipo normal con orientación norte-sur, y en la parte sur del cañón de Agua Chiquita y Las Palomas, presentan igualmente fallas normales con orientación SW-NE .

II.2.3 Geología Histórica.

En la porción de Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica, cuyo rango geocronológico varia desde el Palozoico hasta el Reciente. Las diferentes unidades se pueden definir en tres cinturones preterciarios (fig. II-4), que a su vez estan cubiertos de manera independiente por cuerpos volcánicos del Terciario y Cuaternario.

El cinturón ubicado en el borde oriental, esta costituido de afloramiento de rocas intrusivas y rocas metamórficas, las primeras varian desde tonalitas hasta granodioritas y granitos de edad Cretacica. Las rocas metamórficas, presentan diferentes facies y su

edad no ha sido determinada.

El siguiente cinturón, ubicado al oeste del que se describió anteriormente; lo constituyen secuencias de rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias, cuya edad corresponde al Cretácico interior. La secuencia superior y más extendida fue originalmente denominada por Santillán y Barrera (1930, En Geología de la República Mexicana), como Formación Alisitos. Esta constituido principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítico-andesita, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano-Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas. Esta afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos del Cretácico.

Estos cinturones y todos los demás que se desarrollaron en el occidente de México durante el Mesozoico, han sido relacionados con el choque y hundimiento de una placa oceánica paleopacífica debajo de la placa norteamericana (fig. II-5), y con el volcanismo consecuente. Por esta razón los sedimentos que constituyen la Formación Alisitos, fueron sujetos a un periodo de compresión, que los plegó y metamorfozó parcialmente. Los terrenos que formaron este segundo cinturón, emergieron en el Cretácico superior, y al occidente de ellos se inicio la sedimentación de lo que sería la Formación Rosario.

El tercer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la Península, esta representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior, que se presentan poco consolidados y sin fuertes perturbaciones tectónicas. La secuencia fue denominada por Beal (1948, en Geología de México), como Formación Rosario, y consiste de estratos subhorizontales de areniscas, limolitas, lutitas y conglomeradas con presencia de fósiles marinos y huesos de saurios, evidencia de que los ambientes sedimentarios variaron desde continentales hasta de plataforma y talud, con líneas de costa fluctuantes.

La historia Cenozoica, está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales, y por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo el borde occidental. Durante el Paleoceno y Eoceno, se acumularon sedimentos de ambientes cercanos a la costa. Al Plioceno y Mioceno sedimentario corresponden, al parecer, los potentes espesores de sedimentos fluviales y eólicos; estos sedimentos se encuentran coronados por emisiones lávicas del Mioceno y Plioceno.

Según Gastil et.al. (1975, en Geología de México), en el Eoceno, las montañas Mesozoicas se encontraban completamente desnudas. Estas zonas eran drenadas por corrientes que fluían hacia el Pacífico y alimentaban con sedimentos los depósitos marinos del borde occidental. Posteriormente al Eoceno, la región oriental experimentó algunos hundimientos, lo que sería más adelante el Golfo de California. Durante el período Plioceno-Cuaternario se desarrollaron una serie de levantamientos y vasculamientos de la zona. Durante el Mioceno fue la época de mayor actividad volcánica.

A partir de la disposición y de las características de las unidades en el área se pueden inferir dos etapas tectónicas principales de deformación. La primera, de carácter compresivo, está reflejada en la discordancia entre los sedimentos del Cretácico Superior y la secuencia de dominio de arco insular, que fue la responsable del plegamiento, del metamorfismo y de los principales emplazamientos batolíticos. Esta fase tuvo un episodio que generó la línea Santillán-Barrera, que representa una línea de costa para el Cretácico Superior (rocas clásticas sin deformar) y un gran levantamiento de la región. La segunda fase de deformación está asociada a la apertura del Golfo de California y a la traslación de la península hacia el noroeste. Esta etapa está reflejada en la dislocación que presentan las unidades en los valles tectónicos que generó, y en el volcanismo alcalino reciente.

II.2.3 Unidades Hidrogeológicas.

Las unidades hidrogeológicas son tomadas de la información presentada por las compañías TMI, S.A. e ICG, S.A. y de la cartografía geológica del INEGI, quedando integrado un plano hidrogeológico en el presente trabajo, (fig II-6), y que se puede resumir de la siguiente manera:

UNIDADES IMPERMEABLES

Están representadas por rocas de la Formación Alisitos (Kav), que está compuesta por rocas volcánicas, principalmente tobas ácidas, que se localizan al oriente del valle.

Volcánico indiferenciado (Pbv). Tobas y riolitas, que se localizan en el oriente del valle.

Conglomerado del Terciario inferior (TC). Esta unidad se localiza en las mesetas al oriente del valle.

Grupo Rosario (Krm). Cretácico superior, constituida por arenas poco consolidadas, con poco limo y grava, con conglomerados arcilloarenosos de ambiente marino, se localizan subyaciendo a los conglomerados del terciario inferior.

Basalto (Qba). Compuesto de conos volcánicos y corrientes de lavas compacta, que se localizan al oeste del valle.

Depósitos de origen lacustre (Ql). Estos materiales se localizan fundamentalmente en la línea de costa.

UNIDADES SEMIPERMEABLES

Arenas arcillosas de poco espesor (Tpm) del Terciario superior, localizadas en las partes altas de las mesetas, como la mesa de San Simón.

Depósitos de Talud (Qt). Píamonte, abanicos aluviales y materiales mal clasificados, se localizan al pie de las mesetas.

UNIDADES PERMEABLES

Depósitos de playa (Qpt). Ambiente transicional, arenas finas a medianas sin consolidar.

Dunas (Qd). Estos materiales, por su alta permeabilidad, tienen una

gran importancia ya que permiten la infiltración y se localizan dentro del valle al oeste del poblado de San Quintín.

Aluvión (Qal), arenas finas sueltas con limos y pocas gravas. Estos depósitos están presentes en la parte superior del acuífero

Depósitos de origen fluvial (Qf), gravas y arenas con limo. Estos materiales se encuentran en los cañones y en el valle de San Simón compuestos de material suelto que se encuentra en los subálveos de los arroyos.

El acuífero está formado por material granular sedimentario marino, aluvión y depósitos fluviales. El espesor del acuífero, de acuerdo a la geofísica y pozos exploratorios, varía de 50 a 200 metros y la base es de material arcilloso. Existe un alto arcilloso que hace independiente el valle de San Simón con el de San Quintín, y también a lo largo de la costa se infiere un frente arcilloso. Por otro lado, los pozos cortan lentes arcillosos que en realidad pueden hacer un semiconfinamiento, sin embargo, para fines prácticos de la simulación, y por no tener información suficientemente detallada, se considera a todo el acuífero como libre.

II.3- Modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico.

La recarga natural tiene origen en las precipitaciones que ocasionalmente se presentan en el área de estudio, como ya se mencionó, los factores climáticos son muy desfavorables, ya que comparando las precipitaciones con la evapotranspiración se observa que sólo en condiciones muy especiales se pueden tener excedentes de agua que propicien la infiltración, por lo tanto, la recarga tiene las siguientes variantes a considerar:

a) las precipitaciones torrenciales caen directamente sobre el acuífero y llegan a rebasar la capacidad de campo, propiciando así la recarga vertical. Por otro lado, dado que las rocas de las montañas son impermeables, cuando se presentan estas lluvias se generan

arroyos, que al llegar a la planicie se pierden, lo cual indica que un buen porcentaje es susceptible de infiltrarse.

b) Para las lluvias normales en los arroyos importantes, escurren volúmenes significativos de agua que alimentan al acuífero a través de sus cauces, y pueden ingresar al sistema analizado por medio de flujo subterráneo en los diferentes cañones.

c) El efecto de las neblinas que se presentan en la zona no ha sido cuantificado, sin embargo es posible que ayude a saturar de humedad el suelo y en combinación con la precipitación se puede propiciar la recarga.

d) La recarga inducida se presenta cuando se llegan a infiltrar los excedentes del riego agrícola. Esta recarga está en función de la tecnificación de irrigación, el tipo de suelo y las características físicas del subsuelo. Actualmente es mínima o nula, ya que son pocas áreas que se cultivan en el valle, y se ha implementado el riego por goteo.

e) En la cuenca de San Simón es posible que al ocurrir el deshielo, cuando pasa el invierno, se formen escurrimientos y una parte recargue al acuífero por infiltración.

La descarga del acuífero en condiciones naturales, debió presentarse como una salida hacia el mar o por evaporación en las zonas costeras. Actualmente en el valle de San Quintín se debe exclusivamente al bombeo. En el valle de San Simón, en periodos de lluvias extraordinarias que recuperan en gran medida los niveles, se puede presentar pérdidas por flujo horizontal hacia el mar y por evaporación.

Debido a que existe un desbalance entre la recarga y descarga y considerando que el acuífero tiene comunicación hidráulica con el mar,

el gradiente hidraulico indica un flujo del mar hacia tierra adentro, por lo que el volumen drenado es recuperado en parte del almacenamiento subterraneo, que es alimentado por infiltración vertical de lluvia, y una parte a la alimentación del mar hacia el acuífero. Este fenómeno se nota claramente en la (fig.II-7) , en donde se representa la isolinea 3000 ppm de sólidos totales disueltos para diferentes años; se observa una clara tendencia de avance hacia tierra adentro, y para confirmar esta aseveración se obtuvo la historia química de algunos pozos (tabla II-B). Es evidente que los pozos que estan en el centro del valle, no han sufrido variación a través de los años, en cambio aquellos que estan en la costa incrementaron en los últimos 10 años MAS de 1000 ppm, lo que viene a confirmar que el deterioro del agua subterranea es ya critico, y si no se toman medidas correctivas oportunamente se degradará todo el acuífero.

Por otro lado en el valle de San Simón la isolinea de 3000 ppm tiene un comportamiento muy dinámico, ya que en 1978 se encontraba cubriendo prácticamente el valle y para 1988 se retiró hacia la costa, además tiene la forma de las equipotenciales (fig. VI-8), esto quiere decir que con las precipitaciones de los últimos 10 años se recuperó el acuífero y también se recuperó su calidad.

CONTENIDO DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS EN DIFERENTES AÑOS					
APROV.	AÑO	S.T.D.	APROV.	AÑO	S.T.D.
P93	1974	1374	P244	1974	1118
	1978	1745		1978	1842
	1988	1497		1988	2652
N289	1974	1594	N315	1974	1462
	1978	1780		1978	1476
	1988	4383		1981	2353
P172	1978	1450	P18	1988	3955
	1988	1535		1978	2264
	1978	1090		1981	2631
P35	1981	1094	P321	1988	3510
	1988	1371		1978	3300
				1988	1385

TABLA II-B

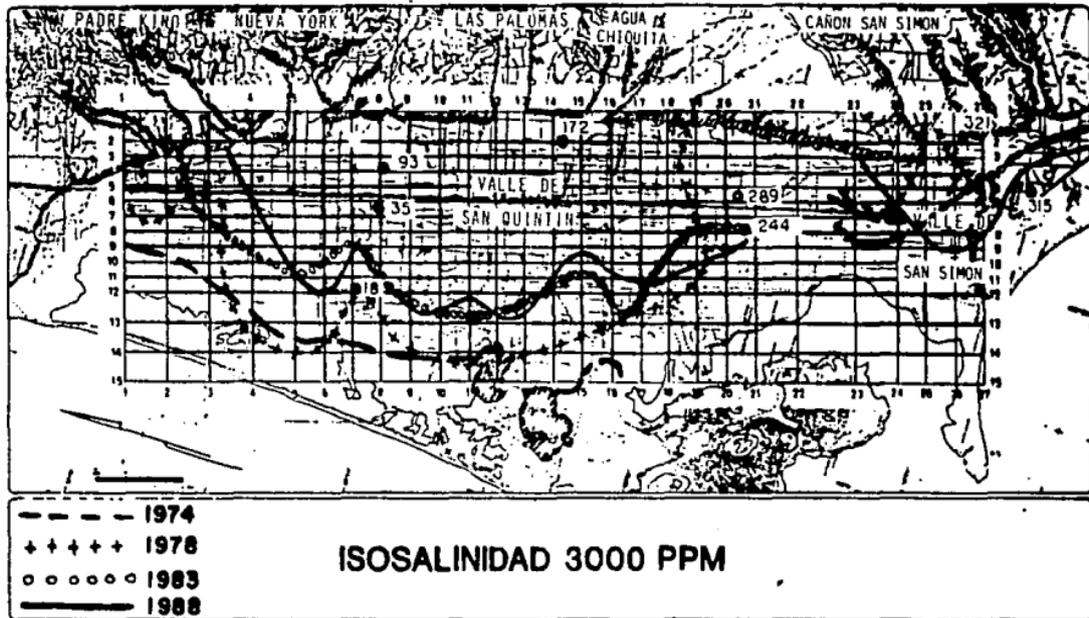


FIG II-7

III.- HIDROLOGIA SUBTERRANEA.

El comportamiento hidraulico del acuífero depende de los coeficientes hidrodinámicos, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, y de las acciones externas como es la recarga y el bombeo, que en conjunto dan una respuesta que se refleja en los niveles piezométricos.

III.1.- Hidrometría de aprovechamientos.

Con la información existente se analizó la variación de extracción con el tiempo, (Fig III-1), en donde se observan dos curvas; una de capacidad instalada y otra de extracción real. La extracción se estima que inició en 1940, con un volumen del orden de $1 \text{ km}^3/\text{año}$, en 1967 se estima que extrajeron aproximadamente 14 km^3 y se incrementó en 1974 a $20 \text{ km}^3/\text{año}$. En 1978 se extraían 26 km^3 y para 1988 se reportan $48 \text{ km}^3/\text{año}$. Sin embargo esta última extracción parece ser muy alta, pues no es razonable que en vista de que se han abandonado pozos en la zona costera por salinidad del agua, y de que algunos aprovechamientos han reducido su rendimiento debido a que al abatirse los niveles sus cámaras de bombeo se redujeron; en consecuencia es poco probable que se extraigan volúmenes tan altos.

Bajo estas apreciaciones se construyó la gráfica (fig. III-2), en donde se aprecia una curva de incremento de aprovechamientos en el valle hasta un total de 956, sin embargo, la curva de aprovechamientos activos solo llega hasta 430 y de 1978 a 1988 no hay un incremento importante. Esto quiere decir que en realidad los volúmenes que se extraen varían con el tiempo, y otra consideración importante es que el método de cálculo es mediante un aforo instantáneo multiplicado por el tiempo de operación, por lo que el cálculo esta en función de la época en que se realice el aforo. Por comunicación verbal de los usuarios mencionan que el caudal disminuye con el tiempo, y que

VOLUMEN DE EXTRACCION VALLE DE SAN QUINTIN, BC

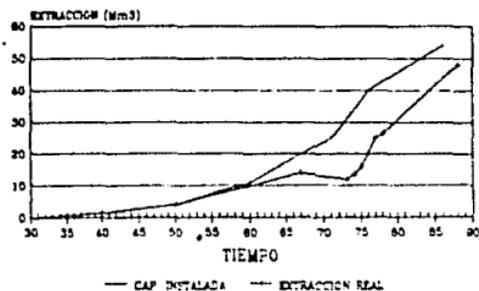


FIG III-1

INCREMENTO DE APROVECHAMIENTO VALLE DE SAN QUINTIN, BC

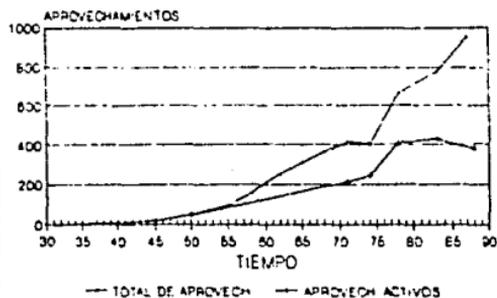


FIG III-2

incluso dejan de operarios cuando no hay suficientes lluvias; de tal forma, que es posible que se hayan estimado volúmenes de extracción muy altos para los últimos años, sobre todo porque de 1978 a la fecha se han registrado lluvias extraordinarias.

III.2.-Piezometría.

Se tiene información con sus planos respectivos en los diversos estudios para los años 1971,74,78,87 y 88. No obstante que se tienen diferentes años con piezometría, es necesario plantear una configuración que permita obtener condiciones iniciales y que sean estables para que no tenga problemas la calibración. Esto se logró haciendo secciones (fig III-3), en donde mediante interpolación con la cota del mar y una elevación probable en los cañones, se obtuvieron elevaciones de las condiciones iniciales; considerando que no había explotación, se obtuvo el plano (fig III-4). Por comunicación personal de los primeros pobladores, mencionan que el pozo 153 localizado en el rancho Las Escobas fue perforado en 1945 y encontraron el agua a 22 mts. de profundidad, de tal forma que la elevación del nivel estático a la altura del rancho mencionado era de 10 mts. sobre el nivel medio del mar, lo que concuerda con la configuración trazada.

III.3.-Coeficientes hidrodinámicos.

La información necesaria para la modelación es un mapa hidrogeológico con sus características, límites y condiciones iniciales del acuífero. Los coeficientes hidrodinámicos se deben representar en planos con curvas de igual transmisividad, así como la relación funcional entre transmisividad y espesor saturado, esto es la conductividad hidráulica, para condiciones de acuífero libre o confinado. Con respecto al coeficiente de almacenamiento normalmente no se conoce, por lo que se puede suponer constante para todo el acuífero y modificarse a medida que se tenga mayor información, de

SECCION HIDROGEOLOGICA VALLE DE SAN QUINTIN

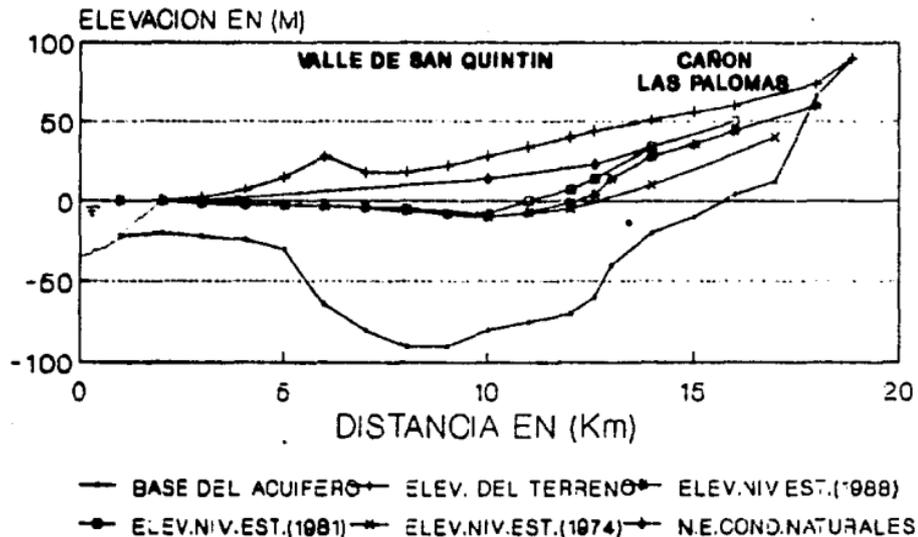


FIG. III-3

ELEVACION DEL N. E. CONDICIONES INICIALES (1940)

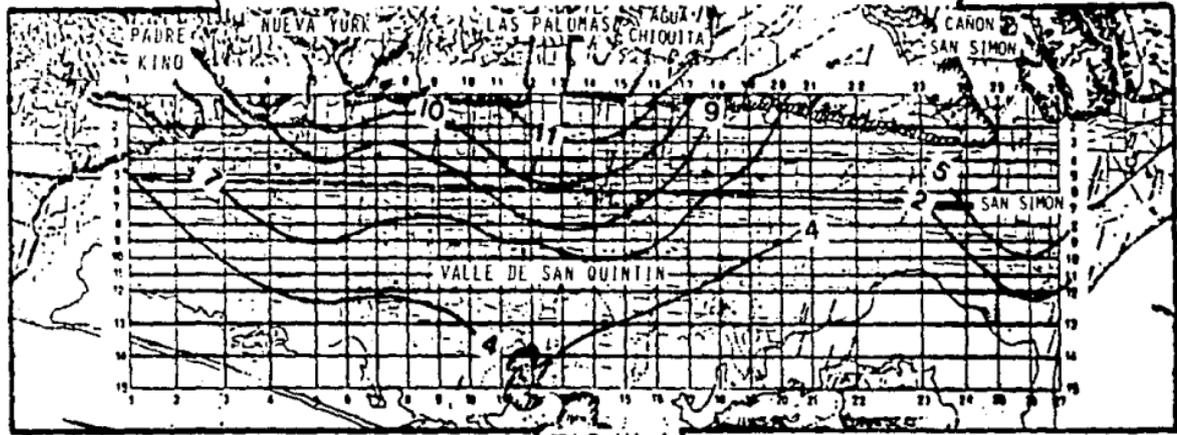


FIG. III-4

tipo geológico o hidráulico que proporcione un valor más acertado

El Valle de San Quintín es un acuífero libre, aunque manifiesta algunas pequeñas zonas de semiconfinamiento. Debido a la sobreexplotación es probable que por la elasticidad del terreno se hayan tenido algunos asentamientos, sin embargo en el caso de que existan, como no se tiene forma de registrarlos, en el presente modelo se consideran invariables las propiedades del terreno.

Se han realizado pruebas de bombeo en 1974, 1978 y 1988 cuyos resultados se utilizaron para elaborar un plano de isotransmisividades (fig. III-5), en donde se puede observar que sólo se tiene información en la parte central del valle.

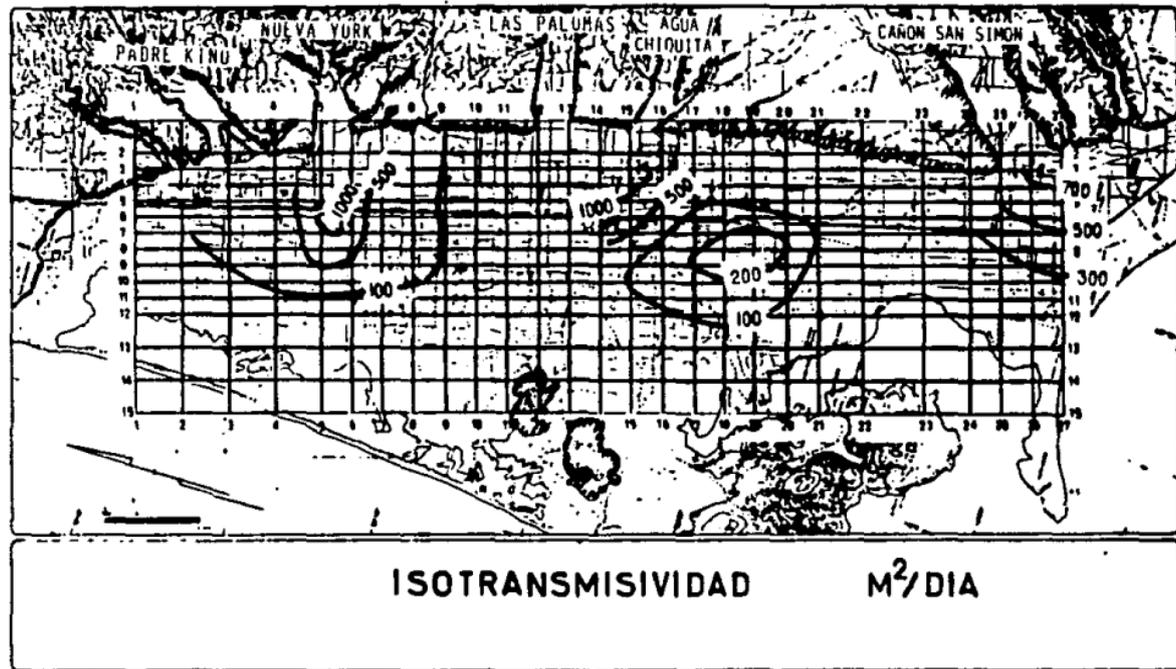


FIG. III-5

IV.-SIMULACION DEL ACUIFERO.

La gran difusión que ha tenido el uso de las microcomputadoras, en el estudio del agua subterránea, permite en la actualidad que se cuente con una gran variedad de modelos digitales, y programas para la resolución de problemas prácticos de geohidrología. Los diferentes tipos de modelos se diferencian en la forma de resolver la ecuación diferencial. El método más desarrollado es el de diferencias finitas que se describe a continuación.

IV.1.-Fundamentación matemática del modelo.

La ecuación diferencial en derivadas parciales (Bittinger y otros, en Boletín 41 del Servicio Geológico), que describe el flujo bidimensional del agua subterránea, bajo condiciones de régimen transitorio, en un medio heterogéneo e isótropo de un acuífero confinado es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T \frac{\partial h}{\partial y} \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

T = Transmisividad

S = Coeficiente de almacenamiento

h = Altura piezométrica.

t = tiempo.

W = diferencia entre los caudales extraídos y recargados por unidad de área.

x,y = Coordenadas rectangulares.

La solución analítica es posible cuando se tienen sistemas más sencillos, por lo que no existe solución general para la ecuación anterior, sin embargo puede obtenerse una solución numérica por medio de un planteamiento en diferencias finitas. Este planteamiento

requiere, en primer lugar, la sustitución del medio físico continuo del acuífero, por un conjunto equivalente de elementos discretos. Trabajando con ordenadores las variables de espacio y tiempo son tratadas como parámetros discretos. En segundo lugar, se escriben en forma de diferencias finitas las ecuaciones de flujo del agua subterránea en un modelo discretizado. Finalmente se resuelve numéricamente el sistema resultante.

Las ecuaciones en diferencias finitas pueden deducirse por dos caminos: desde el punto de vista físico, que consiste en establecer el equilibrio hidrodinámico del elemento a partir de la ley de Darcy y del principio de conservación de la masa, o mediante el tratamiento matemático, sustituyendo las derivadas de la ecuación por diferencias finitas aproximadas. Así el modelo continuo es reemplazado por un sistema de ecuaciones algebraicas, los dos métodos de deducción conducen al mismo resultado.

Planteamiento general desde el punto de vista matemático. Por medio de la serie de Taylor se desarrolla el método de diferencias finitas.

$$f(x+\Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \dots + \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \quad (1)$$

$$f(x-\Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} - \dots + (-1)^n \frac{(\Delta x)^n}{n!} \frac{\partial^n f(x)}{\partial x^n} \quad (2)$$

La diferencia hacia adelante despreciando $n \geq 2$ se obtiene de la ecuación 1.

$$f(x+\Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad \therefore \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

La diferencia hacia atrás, despreciando $n \geq 2$ se obtiene de la ecuación 2.

$$f(x-\Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad \therefore \quad \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{-f(x-\Delta x) + f(x)}{\Delta x} \quad (4)$$

Para aproximar la segunda derivada se suman la ecuación 1 y 2, despreciando términos $n > 2$

$$f(x+\Delta x) + f(x-\Delta x) = 2f(x) + (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} \quad \therefore$$

$$\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} = \frac{f(x-\Delta x) - 2f(x) + f(x+\Delta x)}{(\Delta x)^2} \quad (5)$$

Las aproximaciones en el eje "y" quedarían en forma similar a las ecuaciones 3, 4 y 5.

Si se hace un análisis para un elemento del acuífero discretizado (fig. V-1), en donde la incógnita es la carga hidráulica "h", se obtiene la deducción de la ecuación de diferencias finitas (EDF) mediante el método de sustitución.

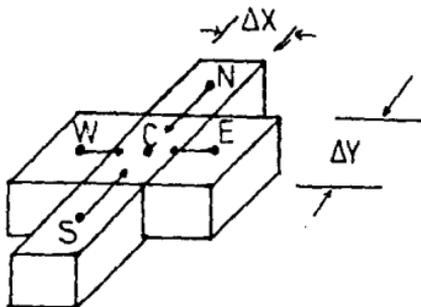


FIG V-1

Considerando el nodo interior de la malla tipo. Aquí la primera derivada de h se aproxima como:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{cx} \cong \frac{h_e - h_w}{\Delta x} ; \quad \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{wc} \cong \frac{h_c - h_w}{\Delta x} ;$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{CN} \cong \frac{hw - hc}{\Delta y} ; \quad \frac{\partial h}{\partial y} \Big|_{sc} \cong \frac{hc - hs}{\Delta y}$$

y a su vez la segunda derivada de h se aproxima como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) &= \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{CE} - \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{WC} \right] = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{hc - hc}{\Delta x} - \frac{hc - hw}{\Delta x} \right] = \\ &= \frac{1}{(\Delta x)^2} \left[hw - 2hc + hs \right] \end{aligned}$$

A si mismo

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{1}{(\Delta y)^2} \left[hw - 2hc + hs \right]$$

Por su parte, la derivada de h con respecto al tiempo se aproxima como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h^{R+1} - h^R}{\Delta t}$$

Aqui la dimensión del tiempo ha sido tambien discretizado; el super indice R representa el nivel del tiempo actual y R+1 el nivel del tiempo un intervalo Δt mas tarde, así $\Delta t = t^{R+1} - t^R$

Sustituyendo las aproximaciones anteriores en la ecuación de flujo se obtiene finalmente la ecuación de diferencias finitas (EDF)

$$\begin{aligned} Tx \left[hw - 2hc + hs \right] \frac{1}{(\Delta x)^2} + Ty \left[hw - 2hc + hs \right] \frac{1}{(\Delta y)^2} = \\ = S \frac{hw^{R+1} - hc^R}{\Delta t} + W \end{aligned}$$

Si el lado izquierdo de la ecuación es evaluado para el nivel de tiempo n , se obtiene el esquema de diferencias explícito hacia adelante

$$\begin{aligned} \frac{T_x}{(\Delta x)^2} \left[hc^{n+1} - 2hc^n + hw^n \right] + \frac{T_y}{(\Delta y)^2} \left[hw^{n+1} - 2hc^n + hs^n \right] &= \\ &= \frac{hc^{n+1} - hc^n}{\Delta t} S + W \end{aligned}$$

El cual puede ser resuelto para hc^{n+1} como sigue:

$$\begin{aligned} hc^{n+1} = hc^n + \frac{T_y \Delta t}{S (\Delta y)^2} \left[hw^n - 2hc^n + hs^n \right] + \frac{T_x \Delta t}{S (\Delta x)^2} \left[hc^{n+1} - 2hc^n + hw^n \right] - \\ - \frac{W \Delta t}{S} \end{aligned}$$

Este esquema es estable solo si la siguiente condición de estabilidad es satisfecha:

$$\frac{T_y \Delta t}{S (\Delta y)^2} + \frac{T_x \Delta t}{S (\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2}$$

Si el lado izquierdo de la EDF es evaluado para el nivel de tiempo $n+1$, se obtiene el esquema de diferencias finitas implícitas hacia atrás.

$$\frac{T_x}{(\Delta x)^2} \left[hc^{n+1} - 2hc^{n+1} + hw^{n+1} \right] + \frac{T_y}{(\Delta y)^2} \left[hw^{n+1} - 2hc^{n+1} + hs^{n+1} \right] = S \frac{hc^{n+1} - hc^n}{\Delta t} + W$$

que resolviendo para hc^n queda de la siguiente manera.

$$hc^n = hc^{n+1} \left[1 + 2 \frac{T_x \Delta t}{S (\Delta x)^2} + 2 \frac{T_y \Delta t}{S (\Delta y)^2} \right] - \frac{T_x \Delta t}{S (\Delta x)^2} hc^{n+1} - \frac{T_x \Delta t}{S (\Delta x)^2} hw^{n+1} -$$

$$-\frac{T_y \Delta t}{S(\Delta y)^2} h_N^{R+1} - \frac{T_y \Delta t}{S(\Delta y)^2} h_S^{R+1} + \frac{W \Delta t}{S}$$

La cual es una ecuación de 3 incógnitas. Esta ecuación no puede ser resuelta independientemente de las ecuaciones similares para todos los otros nodos interiores de la malla. Cuando se plantea una ecuación similar para cada nodo de modelo, resulta un gran sistema de ecuaciones, con "h" como incógnita. Existe una gran cantidad de métodos para resolver el sistema resultante, sin embargo, el modelo de diferencias finitas de Prickett, utiliza una variante del método iterativo implícito en dirección alternante de Peaceman y Rachford (1955, en Boletín 35 del Servicio Geológico)

El planteamiento del sistema implícito de dirección alternante es a partir de las siguientes ecuaciones:

para los renglones

$$\frac{T_y}{(\Delta y)^2} \left[h_N^R - 2hc^R + h_S^R \right] + \frac{T_x}{(\Delta x)^2} \left[h_E^{R+1} - 2hc^{R+1} + h_W^{R+1} \right] = S \frac{hc^{R+1} - hc^R}{\Delta t}$$

para las columnas

$$\frac{T_y}{(\Delta y)^2} \left[h_N^{R+1} - 2hc^{R+1} + h_S^{R+1} \right] + \frac{T_x}{(\Delta x)^2} \left[h_E^R - 2hc^R + h_W^R \right] = S \frac{hc^{R+1} - hc^R}{\Delta t}$$

A grandes rasgos el método consiste en reducir el gran sistema de ecuaciones a varios sistemas más pequeños para cada instante de tiempo. Para ello, se procede en primer lugar por columnas, considerando cada una de ellas separadamente. En una columna se considera el sistema de ecuaciones correspondiente a sus nodos; en este sistema se consideran variables las alturas piezométricas correspondientes a los nodos de las columnas que se están procesando, mientras se mantienen constantes las correspondientes a las columnas

adyacentes. El sistema de ecuaciones resultantes para cada columna se resuelve por el método de eliminación de Gauss. Según PEACEMAN Y RACHFORD (1955, en Boletín 55 Servicio Geológico), el conjunto de ecuaciones a lo largo de una columna así obtenida es un sistema implícito en la dirección de las columnas y explícito en la dirección ortogonal.

Una vez que todos los subsistemas de las columnas han sido resueltos ordenadamente se pasa a aplicar otra vez el mismo procedimiento a los renglones, escribiendo en subsistemas para cada uno. Cuando se concluye con todos los renglones se ha completado una interacción.

El procedimiento descrito se repite el número de veces necesario para conseguir la convergencia de los resultados; una vez alcanzada dicha convergencia se han completado los cálculos para un incremento de tiempo. Las alturas piezométricas así calculadas se utilizan como niveles para el siguiente incremento de tiempo, y así sucesivamente hasta completar el tiempo de simulación programado.

IV.2 Discretización del acuífero.

Una vez construido el modelo conceptual y cuantificados dentro de lo posible los parámetros hidrodinámicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, se dibujó un mapa a escala de la región modelada, en donde se identificaron los principales factores que controlan el flujo, esto es, contorno de nivel constante, zona de explotación, de recarga y descarga, ríos e interferencia entre regiones con distinta transmisividad y coeficiente de almacenamiento. La malla se dibujó sobre dicho mapa ajustándose dentro de lo posible a los contornos de la región y a las interfases entre zonas de distintos materiales.

Para el caso específico de discretización en diferencias finitas, aunque se pueden usar diferentes tipos de mallas (rectangular, cuadrada, poligonal, etc.), el programa utilizado solo permite la malla rectangular. Los nodos pueden estar en el centro de las celdas o en sus esquinas, y la malla queda definida mediante el número de renglones y columnas. El espaciamiento entre ellas puede ser constante (paso constante), o variable (paso variable). La regla para usar distancias variables es que el incremento o reducción no exceda de 1/2 de la distancia contigua.

Para el caso del acuífero de San Quintín, se utilizó una malla de paso variable con 27 columnas y 15 renglones; los nodos se ubicaron en las esquinas de las celdas, con una distancia mínima de 500 m y máxima de 2000 m, entre nodo y nodo; el alineamiento de las columnas tienen una orientación de E-W y la numeración se inicia en orden creciente a partir de la esquina superior izquierda (fig. IV-2). La razón por la que se utiliza un paso variable, es porque en algunas zonas la información es escasa y se le dio 2000 m de separación, y donde se tiene mayor concentración de pozos se redujo la distancia a 500 m.

IV.3- Condiciones iniciales.

En el caso de San Quintín, se tomaron como condiciones iniciales las elevaciones piezométricas correspondientes a una configuración supuesta para condiciones naturales sin explotación (fig. III-2), mencionado en el capítulo III. Estas condiciones iniciales fueron probadas en una simulación en estado estacionario haciendo el coeficiente de almacenamiento mucho muy pequeño ($S=1E-15$), con recarga en los cañones, y descarga natural representada por las celdas de carga constante en la costa, se logró una configuración parecida a las condiciones iniciales (fig. IV-3), lo que demuestra que los parámetros hidráulicos son aceptables.

SIMULACION DE CONDICIONES NATURALES EN FLUJO ESTABLECIDO

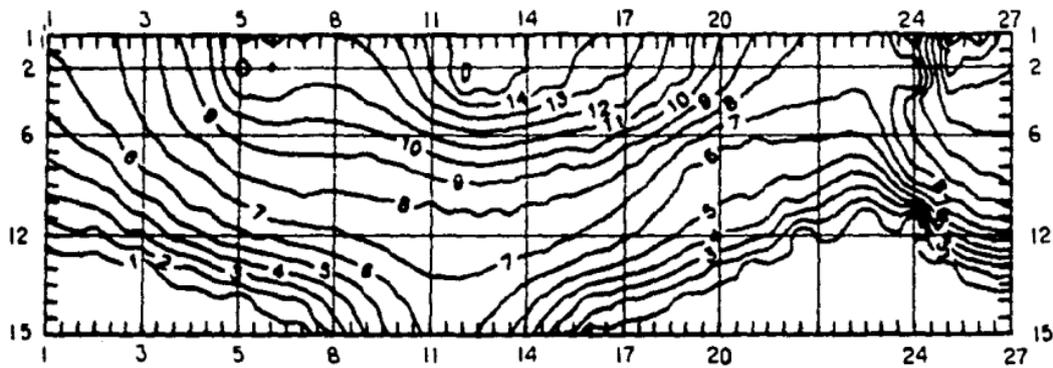


FIG IV-3

La justificación matemática de esta simulación es la siguiente: Para que la ecuación de flujo, en estado transitorio a través de un medio poroso $\nabla^2 h = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$, se convierta en la ecuación de flujo en estado estacionario, se debe igualar a cero el miembro derecho de la ecuación, si el coeficiente de almacenamiento se hace mucho muy pequeño ($S=1E-15$), entonces $\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \cong 0$; por lo tanto: $\nabla^2 h = 0$.

IV.4- Condiciones de contorno.

En muchos casos, como en el valle de San Quintín, se debe simular condiciones tales que asuman la solución en los límites físicos del sistema. Estas son las llamadas condiciones de contorno. En el caso del bombeo de un acuífero recargado por un río, la condición de contorno es que los descensos en el contacto río-acuífero sean nulos; en este caso es el contacto mar-acuífero. Otro ejemplo de condición de contorno es considerar que el flujo perpendicular a una superficie impermeable es nulo. las condiciones de contorno que se aplicaron fueron:

a) Condición de frontera impermeable. Es aquella en la cual no puede haber flujo de agua. Se puede simular haciendo cero las transmisividades en el exterior del mismo. Sin embargo, no se pueden anular los coeficientes de almacenamiento, porque llevaría consigo la detención del programa. Para el caso del modelo matemático de San Quintín se tienen las condiciones de límite impermeable hacia el oriente del sistema modelado, definidos por los afloramientos de conglomerados, que forman una serie de masas, así como también los nodos 12,14 y 12,15, que corresponden a material volcánico.

b) Límite de carga constante. Se define como aquella en la cual no hay cambios en el nivel el agua. Este tipo de contornos se simula fácilmente haciendo muy grande los factores de almacenamiento de los nodos del borde. Para el programa utilizado se recomienda un $S=1E21$. Hacia el NW y SW se tienen condiciones de carga constante por la presencia del mar.

V. FORMULACION FISICA DEL MODELO

Esta etapa del modelo requiere información en todo el sistema modelado y en unidades consistentes, por lo que se analiza en primer lugar las características del programa utilizado, posteriormente se plasman los parámetros en planos y finalmente se alimentan los datos del programa.

V.1 Programa utilizado

A partir del programa de computadoras elaborado por Prickett T.A. y Lonquist C.G. (1971) en fortran IV, para simulación de acuíferos confinados en régimen transitorio, para el caso en que estos sean homogéneos y/o anisotrópicos, bajo condiciones especiales de frontera, tales como límites impermeables, de carga constante o con recarga, se han preparado diversas versiones, entre ellas la versión interactiva en lenguaje Basic, para ser procesada en computadoras IBM-XT o compatible. El programa está escrito de manera tal que puede utilizarse en cualquier sistema de unidades consistente; en el sistema métrico decimal se utilizan las siguientes unidades para las variables geohidrológicas:

Conductividad Hidráulica---	m/día
Transmisividad-----	m ² /día
Gasto-----	m ³ /día
Distancia-----	m
Tiempo-----	día
Carga-----	m

Considera la simulación para acuífero confinado y para acuífero libre, así como casos de bombeo variable. Para la formulación de las ecuaciones de flujo se ha adoptado el método de diferencias finitas, que describe el flujo subterráneo de forma adecuada para la resolución mediante computadoras.

La entrada de datos al programa se puede realizar en forma interactiva y mediante archivo externo ya existente. El programa permite utilizar una malla de paso constante o una malla de dimensión variable en cualquiera de los ejes coordenados y rangos de bombeo variables con el tiempo. La salida de datos se puede obtener a través de un archivo externo, y por impresión de resultados, lo que puede ser en forma numerica, por categorías o ambos, si así se indica. En el caso del archivo externo, usando un paquete graficador, se puede obtener la configuración de las cargas hidráulicas.

V.2- Geometría del sistema acuífero.

El valle tiene una orientación NNW-SSE, de un ancho promedio de 8 Km por 35 Km de largo; hacia el este lo limita las mesetas de conglomerados, que son impermeables, disectadas por los arroyos Padre Kino, Nueva York, Las Palomas, Agua Chiquita y San Simón, que son parte importante del acuífero, por contener material granular muy permeable en contacto con el valle; hacia el oeste lo limita el mar, sin embargo, a lo largo de la línea de costa al NW del valle se tiene material arcilloso, así como material volcánico, por lo que no hay un contacto franco entre el mar y el acuífero; hacia el suroeste y sur del valle el acuífero está totalmente comunicado con el mar; por otro lado existe un alto arcilloso que separa el valle de San Simón con el de San Quintín.

El acuífero está constituido por material granular sedimentario, el basamento lo constituye las arcillas, cuyas profundidades son muy variables desde 40 hasta 200 m. Observando el plano con igual elevación de la base acuífera (fig.V-1), se tienen tres grandes depresiones; al norte, enfrente del cañon Nueva York, tiene una orientación casi E-W con una profundidad promedio de 100 m, 1 Km de ancho y 5 Km de largo. Enfrente de los cañones Agua Chiquita y Las Palomas, la depresión tiene una orientación casi N-S, con una



ELEVACION DE LA BASE ACUIFERA

FIG. V-1

profundidad promedio de 150 m, 2 km de ancho y 12 km de largo y la tercera depresión importante está enfrente del cañón de San Simón con profundidad promedio de 50 m.. Es importante recalcar que en general el acuífero es de poco espesor y a pesar de presentar espesores de 200 m, estos en realidad tienen muy poca extensión y se considera un espesor medio en el valle del orden de 50 mts.

V.3 Distribución de Parámetros.

Este paso dentro de la modelación es muy importante, ya que la información de los parámetros normalmente está localizado en áreas pequeñas, y el modelo exige una distribución en toda el área simulada.

a) Parámetros físicos. (K,S)

La información de pruebas de bombeo se encuentra localizada en el centro del valle, por lo que la conductividad hidráulica en la periferia fue necesario inferirla, tomando en cuenta espesor saturado y un valor de conductividad hidráulica de acuerdo al tipo y características de los materiales.

El coeficiente de almacenamiento calculado por TMI,S.A., fue de 0.17 y por ICG,S.A., de 0.07, por lo que inicialmente se optó por un valor de 0.1, constante para todo el valle. En general es un valor común para acuíferos libres y en la calibración se modificó a un valor medio de 0.07. En la zona arcillosa que divide el valle de San Simón con San Quintín, se atribuyó del orden de 0.2, ya que por la baja conductividad hidráulica, se obtenían abatimientos muy fuertes y en la realidad tiene elevaciones del nivel estático, sobre el nivel del mar, por lo que se corrigió incrementando el coeficiente de almacenamiento. En general las arcillas no pueden tener un coeficiente de almacenamiento tan alto, sin embargo por falta de información en esta porción y para efectos prácticos se simuló con este valor.

b) Volúmen de extracción.

Se han hecho estimaciones de la extracción global en el valle de San Quintín en los diversos estudios, sin embargo, solamente la compañía ICG, SA, presenta una tabla anexa con la hidrometría por pozos, hecha en el periodo de enero a octubre de 1978. En 1988 la compañía ICR, SA realizó también una hidrometría, por lo que se trabajó fundamentalmente con esta información. Es importante mencionar que el modelo es sensible a la extracción en función del coeficiente T/S, por lo que se debe tomar en cuenta la distribución y cuantía de la explotación.

Para determinar la distribución de la extracción se optó por dividir el área en dos zonas, la zona norte que comprende el valle de San Quintín propiamente dicho, y la zona sur que se puede denominar valle de San Simón. Para la zona norte se hicieron dos gráficas (figs. V-2 y V-3), en donde se observa un incremento de pozos activos de 1967 a 1978, pero a la fecha prácticamente no se ha incrementado, en consecuencia tampoco la extracción; en 1978 se obtenían 22 $\text{Mm}^3/\text{año}$ y para 1988 la extracción fue de 24 $\text{Mm}^3/\text{año}$. Para la zona sur no se tiene mucha información, sin embargo en las gráficas de las (figs. V-4 y V-5), se aprecia un incremento de aprovechamientos activos de 1978 a 1988 en un 30% y el volúmen de extracción que en 1978 era de 3 $\text{Mm}^3/\text{año}$, para 1988 fue de 24 $\text{Mm}^3/\text{año}$. Este comportamiento es razonable, ya que la cuenca del arroyo de San Simón es muy grande, y debido a que durante la época lluviosa de 1978 a 1988 los niveles se recuperaron, por lo tanto, es aquí donde sí se ha incrementado la disponibilidad y en consecuencia la extracción.

Indebidamente se maneja la información global del valle de San Simón y el de San Quintín, cuando en realidad sus funcionamientos hidrogeológicos son diferentes; por esta razón se tienen reportes de extracciones muy altas, de tal forma que para efectos de la simulación es fundamental tener la distribución lo más real posible en el espacio

VOLUMEN DE EXTRACCION ZONA DE SAN QUINTIN

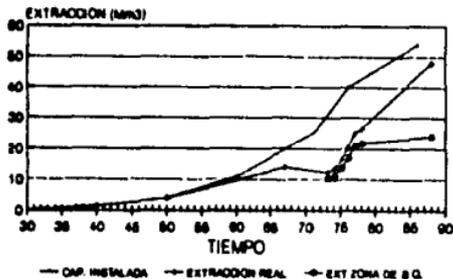


FIG.V-2

VOLUMEN DE EXTRACCION VALLE DE SAN SIMON

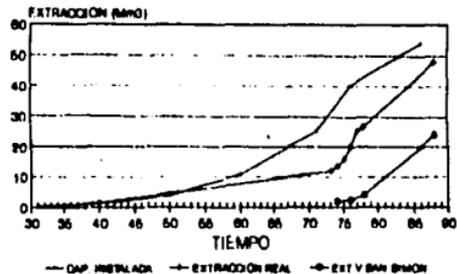


FIG.V-4

INCREMENTO DE POZOS ZONA DE SAN QUINTIN, BC

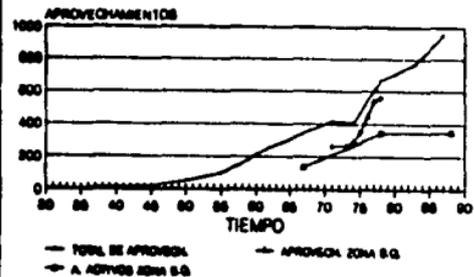


FIG.V-3

INCREMENTO DE POZOS VALLE DE SAN SIMON

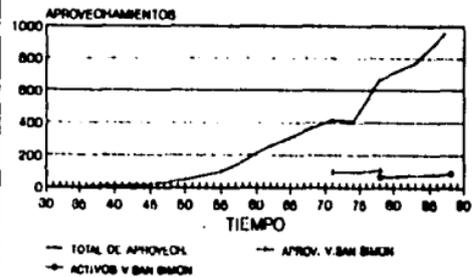


FIG.V-5

y en el tiempo.

Tomando en consideración lo anterior, se formó un plano con la configuración de equipotenciales para 1971, en ella se identificaron el número de aprovechamientos para cada nodo. Se desconocen los volúmenes que se extrajeron por cada nodo, pero su distribución espacial proporciona una idea de la tendencia que tiene. Se realizó lo mismo para diciembre de 1977, aunque en este caso sí se tiene identificado el volumen de extracción por cada nodo en el período de diciembre de 1977 a octubre de 1978 ; finalmente se calculó la extracción por nodo de 1988 que es el último año con reporte de extracciones por pozo.

VI.- CALIBRACION DE LA SIMULACION

Por lo general el conocimiento geométrico e hidráulico de un acuífero no es completo, ya que los diferentes parámetros que se obtienen en principio son escasos y con cierto margen de error. Por lo general son datos puntuales, y en otros casos son valores promedio sobre un área de mayor o menor extensión. También por falta de información se tiene que estimar o suponer; por otro lado, las condiciones en los límites son difíciles de definir correctamente y normalmente difieren sensiblemente de las hipótesis postuladas.

VI.1 Generalidades

El proceso de calibración tiene como finalidad la comprobación de que el sistema simulado responda a las acciones externas de forma paralela a la realidad. Se comparan los resultados y las divergencias encontradas son sujetas a modificaciones, hasta lograr que la simulación tenga cierto paralelismo con la realidad. Debido a que las posibles soluciones son múltiples, se debe tener mucho cuidado en modificar los diferentes parámetros; se deben hacer cambios razonables hasta hacerlos satisfactorios. Pero esas correcciones deben ser compatibles con el conocimiento del sistema y con ensayos que se realicen para analizar las anomalías.

No existen normas fijas para la realización de estas modificaciones. Sin embargo, existe una serie de recomendaciones que hay que tomar en cuenta publicadas en el boletín No. 37 del Servicio Geológico y que se transcriben a continuación.

- 1.- "Es fundamental que en el ajuste intervenga un hidrólogo que conozca el acuífero estudiado...."
- 2.- "Los resultados del modelo no pueden ser mejores que los datos de partida. Esto implica que si los datos son malos, aunque el ajuste

sea bueno, los resultados no serán de garantía, ya que hay infinitas combinaciones de los datos geométricos, hidrogeológicos e históricos que producen los mismos niveles. Evidentemente, si el período que se ha conseguido reproducir es suficientemente largo, la posibilidad de que la combinación de datos ajustados sea incorrecta se reduce considerablemente."

3.- "Para evitar este problema, deben variarse aquellos datos que produzcan el ajuste deseado, siempre que haya una justificación para ello.....", "...Por ejemplo, si se han obtenido niveles demasiado altos y se supone que las transmisividades, recargas y bombeos son correctos habrá que disminuir el coeficiente de almacenamiento."

4.- "...Hay quien cambia únicamente si la justificación física está totalmente comprobada y quien desecha los datos originales si intuitivamente parece que el nuevo valor podría ser aceptable. No conviene olvidar que los datos originales suelen ser puntuales, mientras que el modelo maneja valores medios en cada elemento que pueden ser bastante distintos de aquellos."

5.- "La calibración tiene tres fases bien diferenciadas. En la primera debe comprobarse la coherencia de los datos originales. Conjuntos de datos que parecen correctos, pueden ser incongruentes entre sí, hecho que es detectado rápidamente por el modelo. Esta es una ventaja esencial del uso de modelos. En la segunda fase deben ajustarse las tendencias de los niveles en el espacio y en el tiempo. Esto equivale a comprobar que el modelo conceptual del funcionamiento hidráulico del acuífero es correcto. En algunos casos bastará con esto, pero, en general, hay que realizar una tercera fase en que se intenta conseguir que las diferencias entre los niveles observados y los calculados sean mínimas."

6.- "Una vez realizado el ajuste con la precisión requerida, se puede hablar del modelo del acuífero tratado. Se llama modelo del acuífero al ajuste formado por los datos geométricos e hidrogeológicos

ajustados y el sistema de programas que realiza los cálculos. Los datos de bombeo y recarga no son parte integrante del modelo, ya que son acciones exteriores no influenciadas por el estado del acuífero, y cuyo valor cambia en cada hipótesis de explotación."

7.- "...Conviene elegir un período histórico suficientemente largo y que presente estados extremos del acuífero..."

8.- " Hay que tomar en cuenta que los primeros intervalos no son muy precisos y conviene tener un período de "calentamiento" del modelo..."

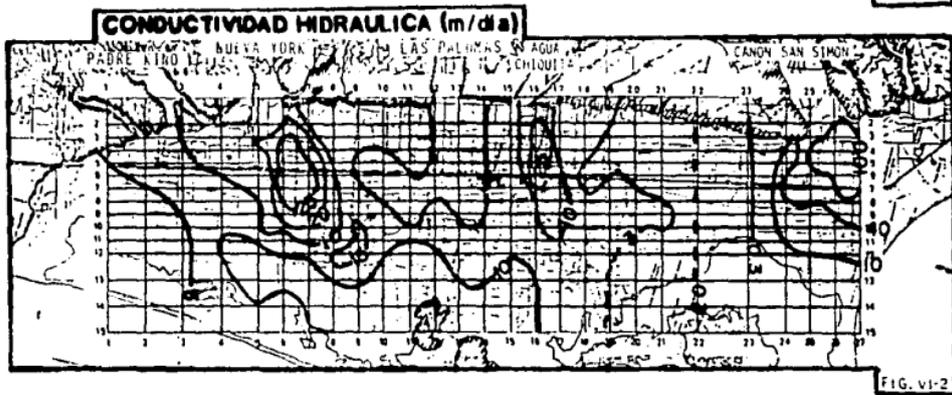
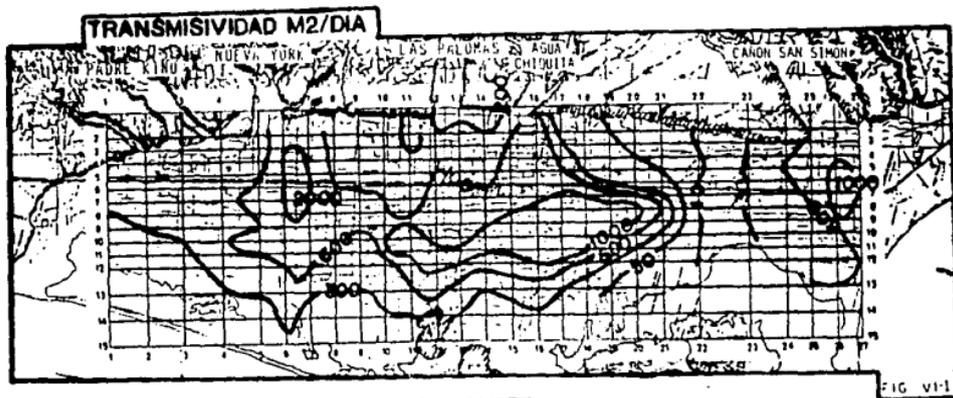
9.- Es difícil dar normas sobre la influencia de los distintos datos en el ajuste, ya que depende del tipo de acuífero tratado..."

" La variación del coeficiente de almacenamiento influye bastante cuando se trata de un acuífero libre, mientras que en un acuífero cautivo no suele ocurrir ..."

" No hay que olvidar que los valores de la recarga por infiltración de lluvia o escurrimiento lateral son conocidos con poca aproximación, pero su influencia en los niveles puede ser grande."

VI.2 Estado de la calibración

Los datos de partida para la calibración fueron obtenidos por un proceso directo y uno inverso, es decir, para la transmisividad se construyó un plano con los datos de pruebas de bombeo, no obstante no son suficientes para cubrir toda el área, de tal forma que con estos datos y el espesor saturado se obtuvo una conductividad hidráulica que posteriormente se atribuyó a los demás nodos, en otros casos, fue necesario utilizar tablas de conductividad hidráulica de acuerdo a los materiales encontrados, y también con el caudal específico se llegó a estimar la transmisividad; finalmente, estos valores se fueron ajustando de acuerdo a la observación de las curvas, llegando a la configuración de isotransmisividad (Fig. VI-1), y de conductividades



hidráulica (Fig. VI-2). El coeficiente de almacenamiento fue sujeto a modificaciones, incrementándolo y/o disminuyéndolo en algunos nodos, de acuerdo a como se observaron las variaciones de las cargas, quedando en la mayoría de los nodos en 7%.

La recomendación en la calibración es tomar casos extremos en un periodo largo, sin embargo, para el valle de San Quintín el principal problema es la hidrometría, ya que observando las gráficas de extracción del capítulo anterior se denota que estas son muy variables en cantidad y en distribución y son además determinantes en las variaciones de las cargas hidráulicas. Por otro lado no se tiene historia de esa distribución; solamente para 1978 y 1988 se cuenta con datos de extracción por nodos.

Otro factor que influye enormemente en las cargas hidráulicas es el de la recarga, cuya distribución en el tiempo es muy aleatoria. Finalmente se optó por calibrar tomando en cuenta los siguientes aspectos:

a) Para variar un parámetro, siempre se reinterpreto toda la información, para decidir cual se debería mover, y se fue modificando uno por uno, para observar el efecto que producía en el acuífero.

b) Normalmente se lograba el ajuste al mover un sólo parámetro pero cuando éste llegaba a un valor muy grande y/o muy pequeño entonces se variaban todos los parámetros físicos hasta un valor aceptable.

c) Para obtener la validación de los parámetros físicos, se realizaron corridas con diferentes distribuciones de extracción, considerando que para un periodo largo, el efecto del bombeo es similar al efecto real, es decir, la forma de los conos de abatimiento, así como su posición, deben ser muy localizados aunque, numericamente no sean iguales a los reales.

d) En las primeras corridas del programa se consideró un sistema que no tiene recarga, con la finalidad de amplificar el efecto, es decir, que los abatimientos fueran mayores en menor tiempo. Las condiciones iniciales fueron las supuestas para un sistema sin explotación, esto es condiciones originales, variando unicamente el bombeo. Posteriormente se simuló partiendo de condiciones iniciales conocidas, bombeo y recarga conocidos.

En la primera simulación se consideró una extracción probable para 1971, suponiendo que los pozos operando en 1971 aún operaban en 1978, esto se obtuvo comparando los planos de 1971 en donde sólo se tiene la distribución de pozos y la de 1978 en donde se tiene la distribución de pozos y su extracción. Al sobreponerlos, los nodos que en 1978 tenían extracción y en 1971 no había pozos, se restó ese volumen quedando una extracción para 1971 de $14 \text{ MM}^3/\text{año}$, que parece razonable. Se corrió el programa con estos datos para un tiempo de 7 años, el cono de abatimiento se localizó en la intersección de la columna 6 a 13 y del renglón 4 al 10, (Fig.VI-3). En la realidad la configuración del nivel estático de 1971 el cono de abatimiento se localizó de la columna 5 a la 11 y del renglón 3 al 7, (Fig.VI-4), de alguna forma coincide, aunque tiene cambios muy bruscos en las cargas que denotan que los parámetros entre un nodo y otro no son congruentes.

La segunda simulación fue realizada con la extracción de 1978 para 7 años en las mismas condiciones que en la anterior y modificando algunos parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento en algunos nodos. En esta simulación el cono de abatimiento tuvo su nivel más bajo en las intersecciones de las columnas 10, 11 y 12 y renglones 4, 5 y 6, (fig.VI-5). Comparando con la configuración real de diciembre de 1977, el abatimiento máximo se localiza en las intersecciones de las columna 10 y 11 y los renglones 5 y 6, (fig.VI-6) esto es, coincide bastante. Posteriormente se hizo intervenir la recarga en los cañones.

En la zona costera, de la columna 1 a la 11, las elevaciones son muy similares a las reales, por lo que se puede considerar que los parámetros son aceptables. En cambio, de la columna 13 a la 21 del lado costero, los abatimientos son mucho mayor que los reales, esto quiere decir que hay que modificar aún los parámetros y no perder de vista que existe una clara aportación de agua de mar hacia esta zona y la infiltración de la precipitación, que no ha sido cuantificada, pero que podría ser la causa por la que no se tiene abatimientos mayores, en cambio la calidad química del agua si ha variado mucho.

La tercer simulación se realizó con la extracción de 1988 para 2025 días, el mayor abatimiento fue en la intersección de las columnas 9 a 13 y renglones 4 a 7, (fig. V-7). En la configuración real el abatimiento mayor es de la columna 7 a la 10 y los renglones 3 al 5 (fig. VI-8). Nuevamente del lado costero de la columna 1 a la 11 son parecidos a los reales y de la 13 a la 21 sigue teniendo abatimientos mayores a los reales.

Revisando nuevamente todos los parámetros se decidió modificar la conductividad hidráulica de los nodos 6,3 al 6,8 y de 7,3 al 7,7 que era un poco alta, así también en la zona costera de la columna 16 a 20 se incrementó la conductividad hidráulica con la finalidad de elevar el nivel estático, por lo que se dieron por terminadas las modificaciones preliminares a los parámetros.

Finalmente se procedió a una simulación con datos reales, en los años que se tiene mejor información. De acuerdo con las precipitaciones medias anuales se puede identificar en los últimos 25 años tres periodos, uno con bajas precipitaciones hasta 1975, otro con lluvias extraordinarias de 1976 a 1980 y el tercero de 1981 a la fecha con precipitaciones medias, por lo que la recarga debió ser indudablemente diferente para cada periodo, de tal forma que de acuerdo con la información disponible, es mas confiable simular un periodo.

Se optó por simular de Diciembre de 1977 a Febrero de 1981 con la extracción reportada por ICO en 1978 considerandola constante para todo el periodo de $23.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ para la zona de San Quintin y de $2.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ para la zona de San Simón. De acuerdo a la configuración de 1981 (fig. VI-10) se observa que se tiene una recarga importante en los cañones, pues el cono de abatimiento se reduce en extensión, sin embargo tiene valores de -11 metros bajo el nivel del mar. Esto significa que la recarga a pesar de ser importante, no es mucho mayor a la extracción.

Para efectos de la simulación en los cañones la recarga se representó como inyección de agua y con un valor constante, a pesar de que en realidad esta se debe presentar en un periodo de 4 meses, ya que las lluvias se presentan de noviembre a febrero, pero el tiempo que tarda en llegar como recarga se desconoce, por no contar con un hidrógrafo con lecturas mensuales de 1978 a 1988. Por otro lado esta recarga tiene dos componentes; una es cuando el agua se infiltra en los cañones e ingresa al sistema analizado como flujo subterráneo y otra cuando el agua escurre y llega superficialmente hasta el valle, en donde se infiltra, por lo que el tiempo de llegada al sistema acuífero es diferente. Como no hay información suficiente para separarlos, se simuló como una recarga total que ingresa al sistema en los nodos correspondientes a los cañones.

En la zona costera existe un problema similar, ya que en este caso los niveles freáticos son someros inferiores a 15 mts. y los materiales superficiales muy permeables compuestos por arenas que incluso forman dunas en algunas zonas, por lo que la recarga vertical es importante, por otro lado el gradiente hidráulico inducido por la explotación genera una componente del mar hacia el acuífero, en consecuencia, ingresa al sistema un importante volumen de agua salada evidenciado por la gran cantidad de pozos que han dejado de operar una vez que se han salado, pero tampoco es posible hacer una separación de estos volúmenes por no contar con suficiente información de monitoreo

en calidad del agua, su distribución en planta y perfil. Por lo tanto, la incertidumbre de los parámetros en la zona costera durante la calibración, obligó a considerar una recarga, que se puede atribuir a la parte infiltrada de la precipitación y a la intrusión salina.

Con respecto a la recarga en los cañones, esta se calculó por la ley de Darcy. Es importante señalar que se tiene poca información en cuanto a piezometría y nivelación, por lo que el dato obtenido es en realidad una estimación. En la zona costera, empleando el mismo método, se calcularon entradas por flujo subterráneo y se distribuyeron en los nodos que colindan con la costa, simulándolos como inyección de agua. En este caso aparentemente se incurre en un error al aplicar Darcy, debido a que el flujo es de agua marina, cuya densidad es mayor a 1, por lo que la conductividad hidráulica disminuye. Sin embargo, en la zona donde se calcularon las entradas subterráneas se tiene una salinidad del orden de 3000-4000 ppm, por lo que el error es mínimo. Por otro lado, el dato obtenido es apenas un valor aproximado de las entradas, ya que finalmente se incrementaron para obtener la configuración deseada, cuidando que el valor estuviera dentro de un rango aceptable.

Con todas estas consideraciones se obtuvo la configuración del acuífero (fig. VI-9), en donde se observa que la columna 1 al 13 coincide bastante bien entre la configuración simulada y la real (fig. VI-10), pero en la zona costera de la columna 14 a la 20 se siguen teniendo problemas. Al parecer es porque la recarga fue muy baja y mal distribuida. Para lograr esta configuración se le puso recarga de $5.4 \text{ MM}^3/\text{año}$ en la zona costera norte; a la zona centro (infiltración vertical) $3.0 \text{ MM}^3/\text{año}$; zona costera sur $2.6 \text{ MM}^3/\text{año}$; esto da un total de $11 \text{ MM}^3/\text{año}$. En los cañones la recarga fue de $3.4 \text{ MM}^3/\text{año}$ en Agua Chiquita, Las Palomas $4.2 \text{ MM}^3/\text{año}$, Nueva York $4.6 \text{ MM}^3/\text{año}$ y Padre Kino $0.4 \text{ MM}^3/\text{año}$, con un total de los cañones de $12.6 \text{ MM}^3/\text{año}$ y sumado a la zona costera da en total $23.6 \text{ MM}^3/\text{año}$.

SIMULACION CONDICIONES INICIALES CON BOMBEO DE 1971. 7 AÑOS

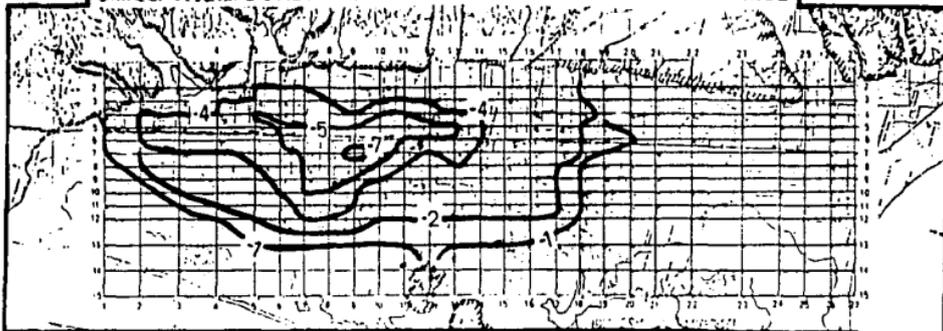


FIG VI-3

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO 1971

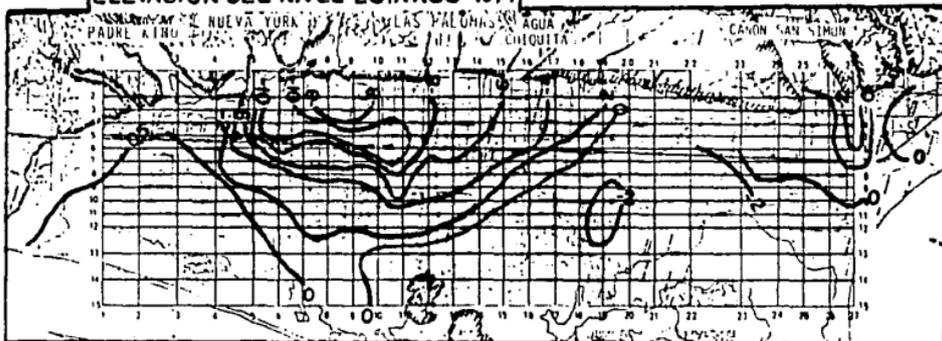
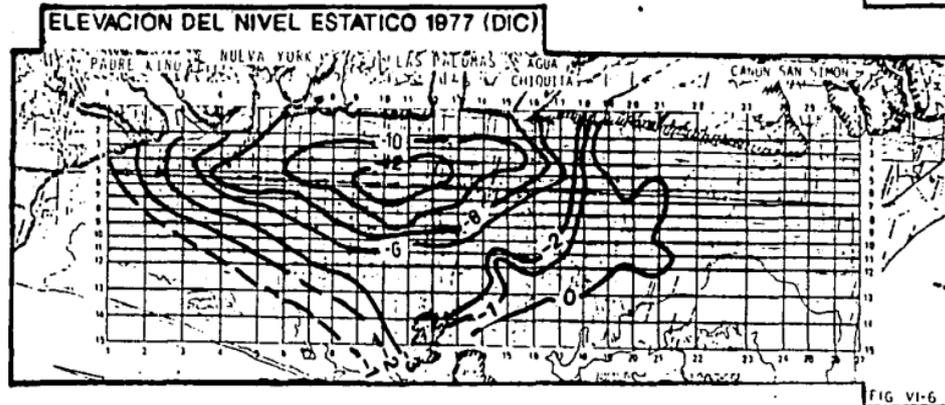
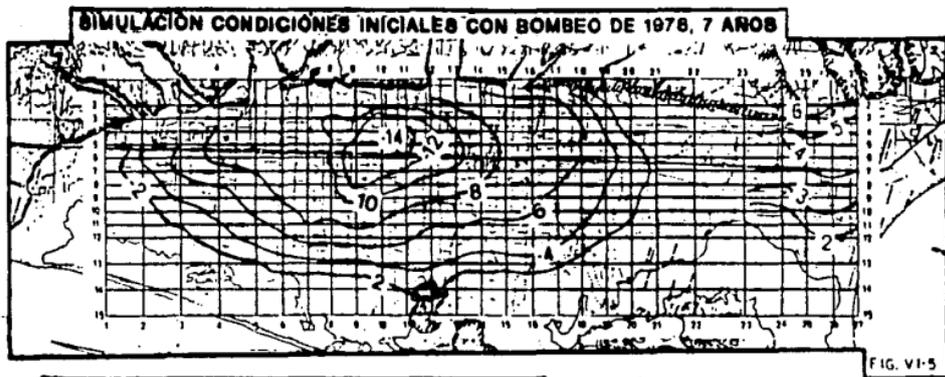


FIG VI-4



SIMULACION CONDICIONES INICIALES CON BOMBEO DE 1988, 7 AÑOS

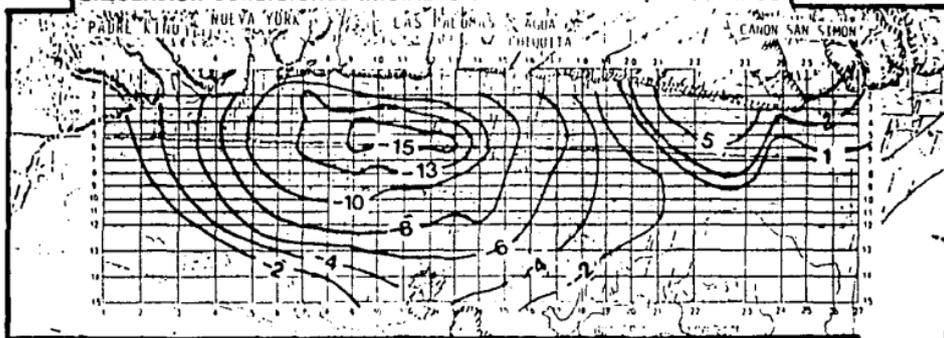


FIG. VI-7

ELEVACION DEL NIVEL ESTÁTICO FEB-1988

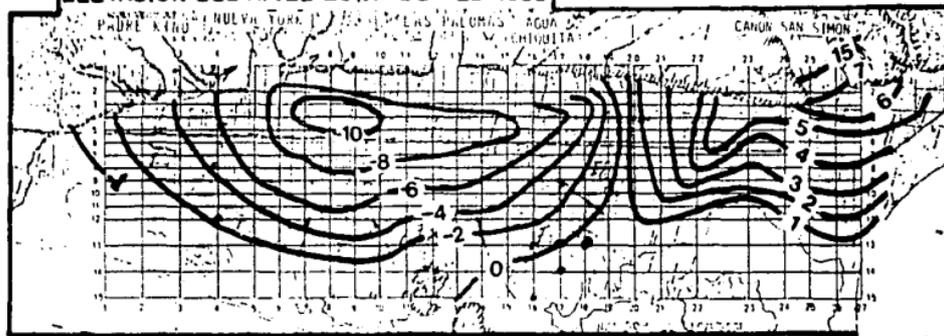


FIG. VI-8

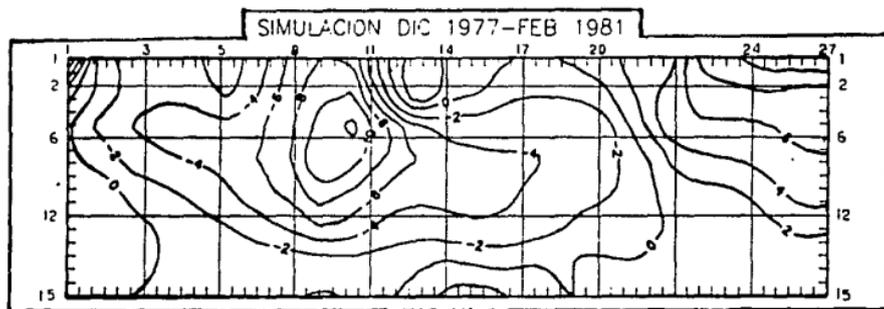


FIG. VI-9

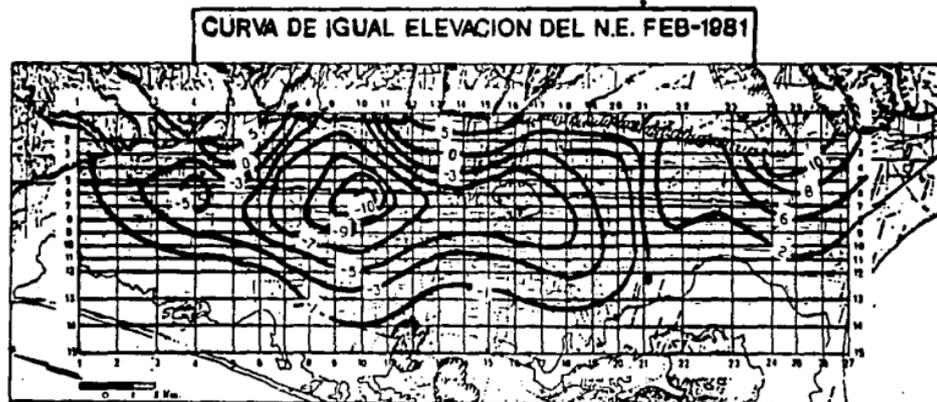


FIG. VI-10

VII.-OPERACION DE LA SIMULACION.

La calidad del modelo depende de la calidad de la información para calibrarlo, por otra parte, un período de validación no es suficiente para hacer predicciones, sin embargo, el uso de los modelos permite analizar alternativas de tipo cualitativo, por lo que el modelo de San Quintín fue calibrado con la información disponible y puede usarse como una herramienta para la toma de decisiones. En el futuro a medida que se tenga mayor información, es necesario actualizarlo. En sí las simulaciones aquí presentadas deben considerarse como la primera fase de la utilización del modelo.

VII 1.-Alternativas de explotación.

La zona de San Quintín es la zona que requiere soluciones inmediatas, sin embargo, se deben considerar diversos aspectos, como es el hecho que una gran cantidad de pozos fueron construidos ilegalmente, otros tienen salinidad mayor a 3000 ppm, etc., por lo que se puede pensar en cancelar los pozos ilegales y distribuir el volumen excedente entre los pozos legales salados. Otra opción podría ser distribuir el volumen total de recarga entre todos los pozos con salinidad menor a 3000 ppm y cancelar los que estén salados; otra alternativa es distribuir uniformemente la extracción, etc. Cualquier propuesta conlleva a una repercusión económica y social, por lo que las alterantivas deben contemplar diversos aspectos.

La solución inmediata más viable es la de ajustar la extracción, tomando en cuenta que todos son responsables de la degradación del acuífero, ya que conciente o inconcientemente se sigue aumentando la explotación. Por una parte los ranchos grandes, a pesar de que han optimizado el uso del agua mediante sofisticados métodos de riego por goteo, extraen volúmenes muy altos de agua subterránea, que normalmente, mediante varios pozos de su propiedad o rentados,

almacenan el agua en pilas o bordos y posteriormente la rebomban hasta sus áreas de cultivo a distancias incluso de 15 Km. Por otro lado, los ejidatarios o pequeños propietarios que aún cultivan, riegan sus parcelas con el método tradicional de gravedad, en ocasiones desperdiciando volúmenes importantes en la conducción, de tal forma que se debe hacer una gran campaña de concientización en los usuarios, sobre la necesidad de reducir el volumen de extracción actual, y que esta medida es posible llevarla a cabo mediante un reglamento específico sobre la explotación del agua subterránea, ya que finalmente el recurso es de todos y se tiene la obligación de cuidarlo. Con este fin se analizaron tres alternativas de reducción de extracción.

Primera alternativa.

La reducción de la extracción esta condicionada por la salinidad, ya que contempla que sólo una pequeña parte del acuífero es de agua dulce, por lo que se pretende proteger esa porción reduciendo considerablemente la extracción, y la zona salada continuaría con su extracción actual. Esta condición se logra mediante tres reglas:

- a).- Los pozos con salinidad mayor a 3000 ppm, siguen operando con su volumen actual de extracción .
- b).- Los pozos con menos de 3000 ppm y con extracción menor a 40,000 m³ anuales siguen operando.
- c).- Los pozos con menos de 3000 ppm y volumen de extracción mayor a 40,000 m³ anuales solo deben extraer hasta 40,000 m³/año.

Segunda alternativa.

Es una propuesta de reducción de volumen, pero es independiente de la calidad del agua, aplicando un porcentaje proporcional, en este

caso los aprovechamientos que extraen menos de 20000 m³/año no sufren modificación, en cambio los que extraen volúmenes altos, se ven reducidos hasta 70%. Ejemplo.

REDUCCION DE VOLUMEN, ALTERNATIVA 2

VOLUMEN DE EXTRACCION Mm3/año	VOLUMEN RECOMENDADO Mm3/año
20 000	20 000
60 000	50 000
180 000	110 000
500 000	260 000
1000 000	325 000

Tercera alternativa.

Contempla que el acuífero de la zona San Quintín no soporta extracciones muy altas, por lo tanto se propone que un pozo no extraiga más de 100 000 m³/año, independientemente de la calidad del agua.

REDUCCION DE VOLUMEN, ALTERNATIVA 3

VOLUMEN DE EXTRACCION Mm3/año	VOLUMEN RECOMENDADO Mm3/año
25 000	25 000
50 000	48 000
75 000	62 000
100 000	81 000
125 000	100 000
>125 000	100 000

VII.2 Simulación del acuífero.

Las tres alternativas fueron simuladas con una recarga media. La zona de San Simón $5 \text{ Mm}^3/\text{año}$, y San Quintín $18 \text{ Mm}^3/\text{año}$; las condiciones iniciales corresponden a la configuración de 1988, y se simuló para un período de 10 años.

Alternativa No 1

Bajo los criterios establecidos se tendría para la zona de San Quintín, una extracción en la zona costera de $8 \text{ Mm}^3/\text{año}$ con salinidad mayor a 3000 ppm mediante 80 aprovechamientos; dentro de la zona cuya salinidad es inferior a 3000 ppm, se encuentran 45 aprovechamientos. que extraen menos de $40\,000 \text{ m}^3$, dando un volumen de $0.9 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y 116 pozos rebasan ese volumen, cuya extracción es de $18 \text{ Mm}^3/\text{año}$, por lo que se vio reducido en la simulación a $4.6 \text{ Mm}^3/\text{año}$; en total se simuló $12.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$ de extracción que representa el 46 % del volumen actual en el área modelada.

En la zona de San Simón, al aplicar este criterio, se vio bastante afectado, ya que todos los pozos extraen más de $40,000 \text{ m}^3$ anuales c/u y la salinidad en 1988 no les afecta, por lo que 19 aprov. que extraen anualmente 10 Mm^3 , se vieron reducidos en la simulación a $760,000 \text{ m}^3/\text{año}$, que es prácticamente nula.

Con estas condiciones se logra recuperar el acuífero 6 metros en la zona más crítica de San Quintín, en un período de 10 años, sin embargo sigue habiendo elevaciones del nivel estático de 3 m.b.n.m. cercano a la costa. (Fig. VII-1).

Alternativa No. 2

Se pretende que todos los usuarios independientemente de la salinidad, bajen su ritmo de extracción en forma proporcional. Los que extraen un volumen bajo, la reducción es mínima, aquellos que extraen volúmenes altos la reducción es mayor, bajo el criterio establecido la extracción simulada fue de 4.24 $\text{Mm}^3/\text{año}$ en San Simón, y 16.6 $\text{Mm}^3/\text{año}$ en San Quintín, con estas condiciones la recuperación fue de 4 m en el cono de abatimiento y casi toda el área continúa bajo el nivel del mar. (Fig. VII-2).

Alternativa No. 3

En esta alternativa se propone una reducción fuerte pero más flexible que la alternativa 1. En la zona de San Simón se mantuvo la extracción de 4.2 $\text{Mm}^3/\text{año}$ de la alternativa 2, ya que si se aplican las restricciones quedaría un volumen inferior a 1 $\text{Mm}^3/\text{año}$. En la zona de San Quintín la extracción simulada fue de 14.5 $\text{Mm}^3/\text{año}$, que representa el 51 % de la extracción actual. (Fig. VII-3). En general se recupera todo el acuífero y queda un pequeño cono de 3 metros bajo el nivel medio del mar.

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO FEB-1988

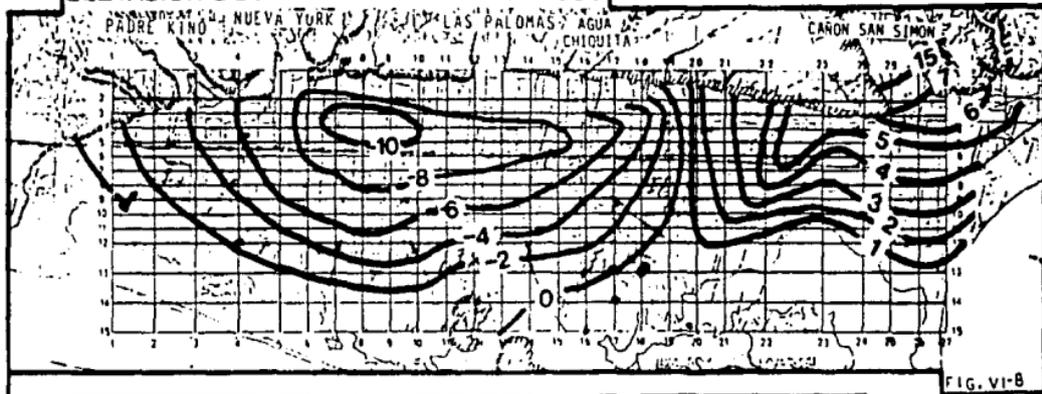


FIG. VI-8

ALTERNATIVA 1, REDUCCION DE VOLUMEN, 10 AÑOS

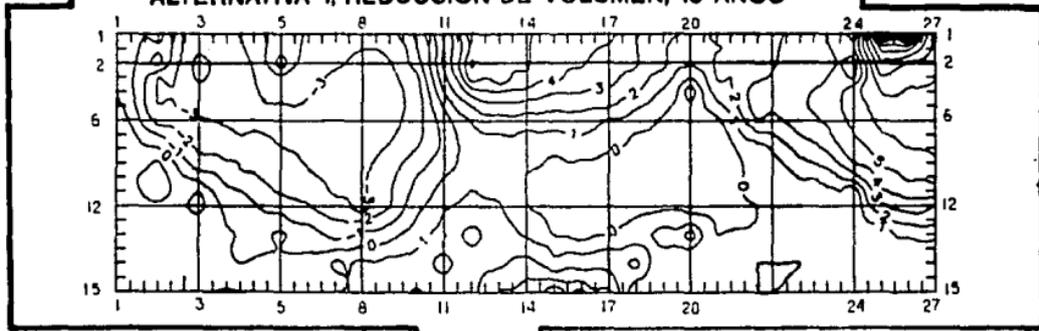


FIG. VII-1

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO FEB-1988

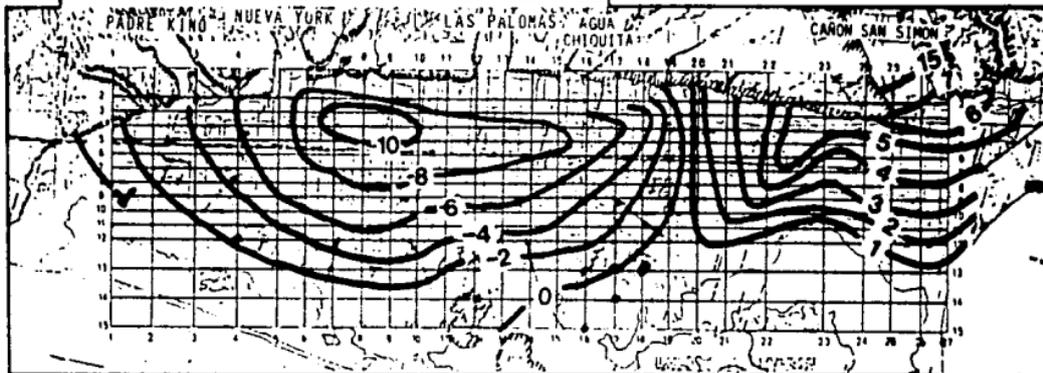


FIG. VI-8

ALTERNATIVA 2, REDUCCION DE VOLUMEN, 10 AÑOS

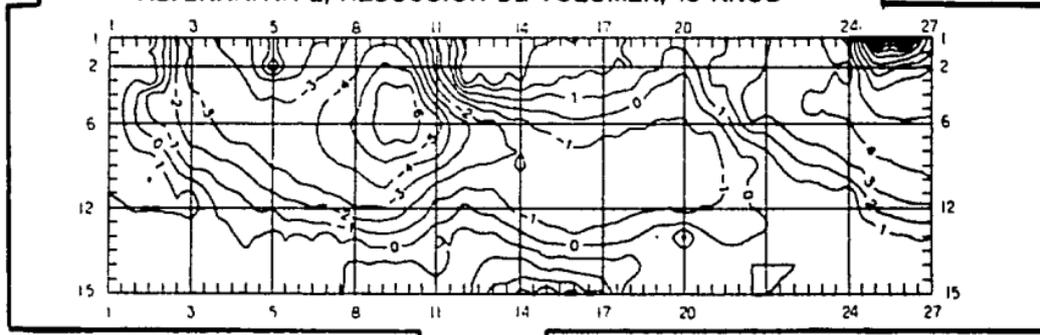


FIG VII-2

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO FEB-1988

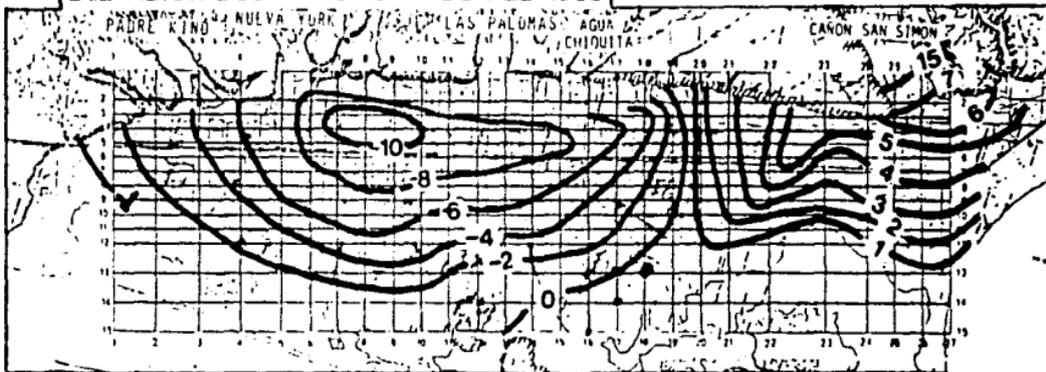


FIG. VI-8

ALTERNATIVA 3, REDUCCION DE VOLUMEN, 10 AÑOS

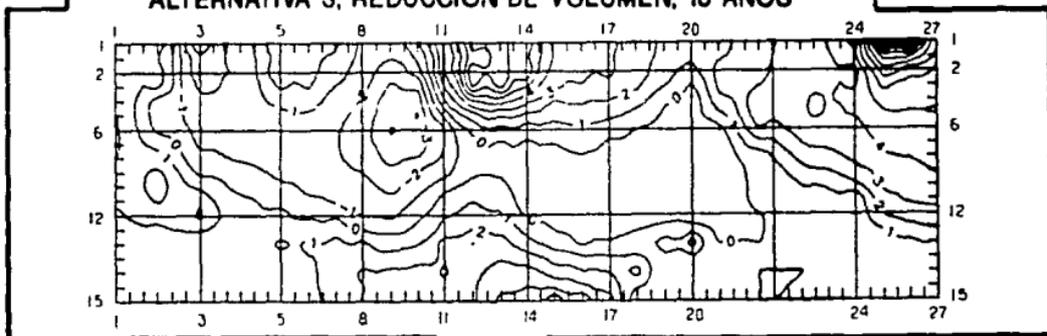


FIG VII-3

VII. 3.- Consideraciones finales.

Se debe recordar que la parte modelada corresponde mayoritariamente a la zona de San Quintín y una parte a la zona de San Simón. Las alternativas propuestas están encaminadas a la reducción de extracción, porque es la forma inmediata de recuperar el acuífero, y esto se debe llevar a cabo mediante un reglamento que sea aplicable a las 3 zonas en que se divide el llamado "Valle de San Quintín". A continuación se presenta una tabla con el número de aprovechamientos activos en 1988 y su extracción por rangos, con la finalidad de tener un mejor criterio al momento de tomar una decisión.

VOLUMEN DE EXTRACCION POR RANGOS

RANGO DE EXTRACCION	SAN QUINTIN		SAN SIMON		CARON DE S. SIMON	
	No DE APROV.	VOLUMEN (Mm ³)	No DE APROV.	VOLUMEN (Mm ³)	No DE APROV.	VOLUMEN (Mm ³)
0 - 20000	117	0.504	5	0.054	0	0.0
20000 - 50000	50	1.779	0	0.0	0	0.0
50000 - 100000	57	4.131	3	0.258	0	0.0
100000 - 200000	70	9.932	8	1.283	6	0.843
200000 - 300000	24	5.887	3	0.742	4	1.045
300000 - 400000	7	2.337	3	1.176	5	1.672
400000 - 500000	3	1.342	1	0.466	2	0.904
500000 - 600000	0	0.0	1	0.539	1	0.561
600000 - 700000	1	0.630	1	0.622	1	0.648
700000 - 800000	0	0.0	0	0.0	1	0.726
800000 - 900000	0	0.0	4	3.433	1	0.803
900000 - 1000000	1	0.972	2	1.913	1	0.933
MAYOR 1000000	0	0.0	3	4.064	3	3.317
TOTAL	263	28.256	34	14.464	25	11.585

La zona de San Quintín es la que requiere de una reducción mayor, pero esta debe ser acorde con la situación regional, sobre todo por

que hay una estrecha relación entre las diferentes cuencas y se debe buscar el mejor beneficio .

Otra consideración importante del modelo es su sensibilidad a la extracción y recarga, en las fronteras los parametros son poco conocidos y las variaciones son muy fuertes, en los nodos donde se simula recarga tienen elevaciones mayores a las reales y afecta a los nodos adyacentes. Esto se corrigió poniendole una conductividad hidráulica mayor a la real, por lo que los datos confiables están en el interior del área modelada.

VII.4.- Discusión de resultados

Dadas las características de la simulación los resultados son de tipo cualitativos, por lo que para compararlos se eligieron tres secciones en la zona de San Quintín, que corresponde a las columnas 4, 10 y 16 en la parte norte, centro y sur respectivamente. Para la zona de San Simón no se presenta sección, ya que en las tres alternativas la carga hidráulica se mantuvo sobre el nivel medio del mar y además la recarga en esta cuenca es muy dinámica, por lo que requiere de un análisis diferente.

En las secciones se presenta las diferentes cargas hidráulicas de los resultados, nivel estático en 1988 y las condiciones originales (1940). En la sección de la columna 4 la alternativa 1 y 2 tienen un comportamiento similar con una recuperación del orden de 2 metros, la alternativa No. 3 tuvo mejores resultados, recuperando 4 metros en la parte central del valle, y aún queda 2 m bajo el nivel del mar , pero en la zona costera se recupera satisfactoriamente, lo que contribuye a la disminución de la intrusión marina (fig. VII-4).

En la columna número 10, la mejor alternativa es la número 1, con recuperaciones de 7 metros en el cono de abatimiento, en segundo

69 ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

termino está la alternativa 3 con recuperacion de 6 mts; hacia la costa el comportamiento es similar, llegando incluso a ser mejor la alternativa 3. Con respecto a la alternativa 2 se recupera muy poco, del orden de 2 metros. En general la carga hidráulica sigue estando 2 mts. bajo el nivel del mar y en términos prácticos se recupera el acuífero bastante bien (fig. VII-5).

En la columna 16 las tres alternativas recuperan del orden de 7 mts.; su comportamiento es muy similar, quedando las elevaciones en su mayoría sobre el nivel del mar (fig. VII-6).

Definitivamente las alternativas 1 y 3 son las mas adecuadas para recuperar parcialmente el acuífero a mediano plazo. Con respecto a la número 1, tiene la particularidad de que los aprovechamientos en la zona costera con mas de 3000 ppm seguirían operando con su regimen actual. Esto significa que la intrusión salina continuaría con el mismo ritmo y en poco tiempo dejarían de operar por mala calidad del agua, sin embargo, esta condición sigue afectando a todo el valle. Otro inconveniente es la reducción del volumen a solo 40 000 m³ anuales por pozo; esta medida afectaría a 116 aprov. que extraen 18 MM³/año, quedando en solo 4.6 MM³/año, esto es al 25 % , lo que traería como consecuencia una afectación económica muy fuerte.

En el caso de la alternativa 3, la reducción del volumen es mas uniforme y se permite extraer como máximo hasta 100 000 m³ anuales y los que extraen menos de esta cantidad se ven afectados en una proporción baja, de 6 millones se reducirían a 4 MM³/año y los que extraen volúmenes altos, cuya extracción actual es de 22 millones se reducirían a 10.5 MM³/año, en total la reducción es del 31 % , las recuperaciones son practicamente las mismas que la alternativa 1, con la ventaja de recuperar mas rapidamente los niveles en la zona costera y es mas flexible en la afectación a los usuarios. Finalmente se logra recuperar parcialmente el acuífero a mediano plazo, por lo que es la mejor alternativa de las tres analizadas.

RESULTADOS COLUMNA 4

SIMULACION 10 AÑOS

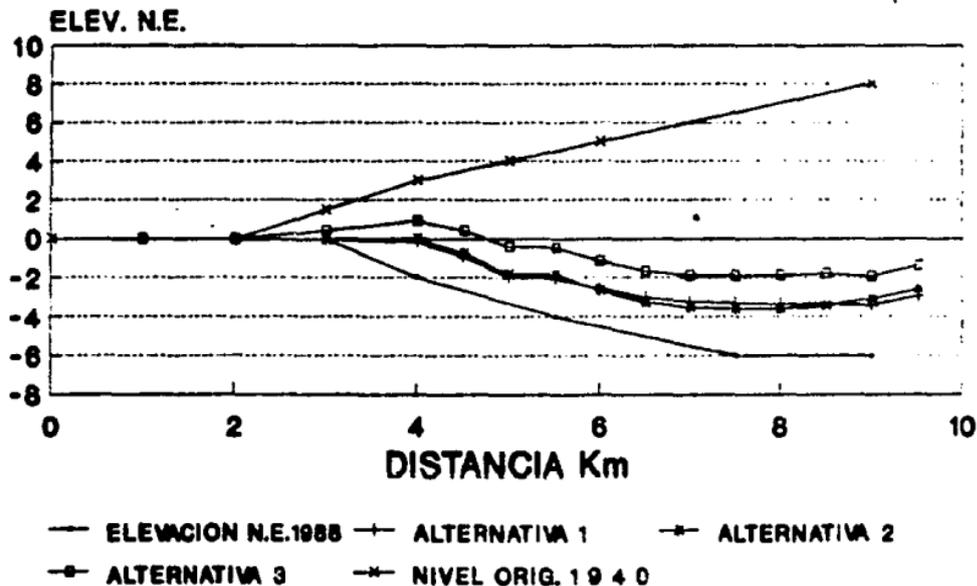


FIG VII-4

RESULTADOS COLUMNA 10 SIMULACION 10 AÑOS

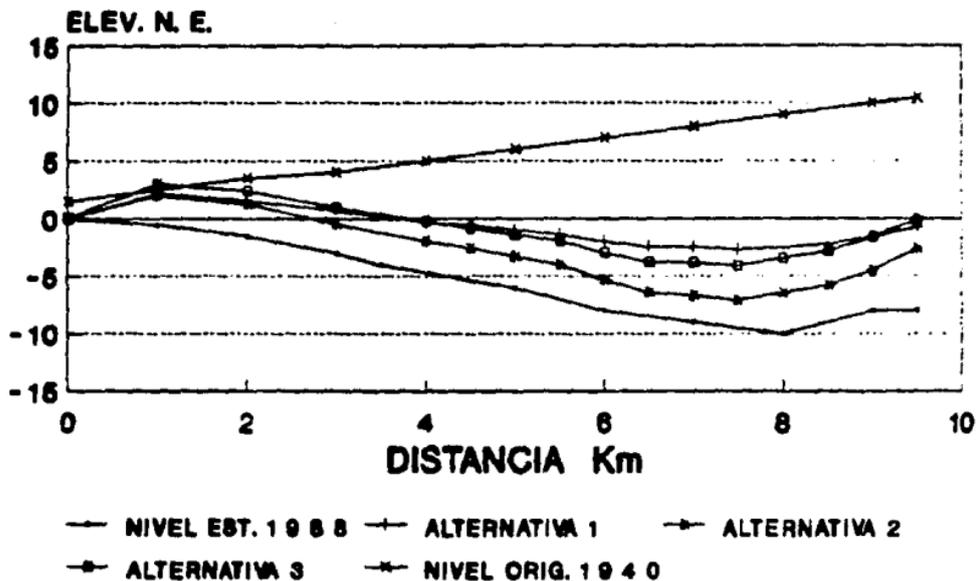


FIG. VII-5

RESULTADOS COLUMNA 16

SIMULACION 10 AÑOS

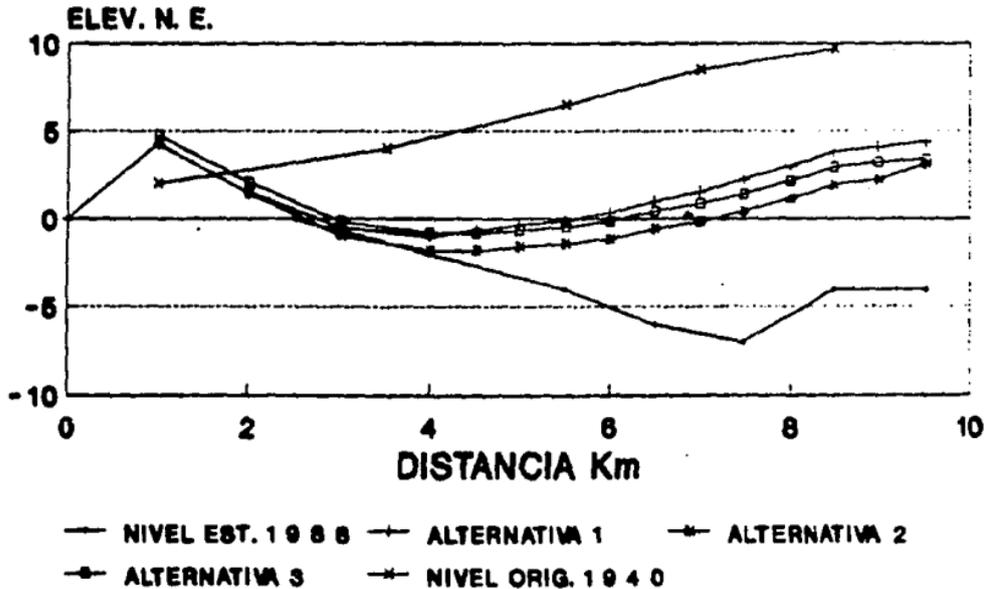


FIG. VII-6

CONCLUSIONES

1.- El Área en estudio está influenciada por dos subcuencas hidrologicas principales; A) el acuífero de San Simón, cuyo arroyo tiene una cuenca de 1644 km² hasta su desembocadura al Océano Pacífico, y, B) los arroyos que drenan a la zona de San Quintín; Agua Chiquita, las Palomas, Nueva York y Padre Kino que sumados tienen una área de 946 km². La zona acuífera es de 244 km².

2.- El Valle de San Quintín tiene una precipitación media anual de 146 mm en un período analizado de 1949-60, con temperatura media anual de 16^o C. Es probable que en la parte alta de la sierra de San Pedro Mártir la precipitación alcance los 500 mm, con temperatura media anual de 12^o C. El período de lluvias se presenta de octubre a marzo y corresponde con una disminución de la evapotranspiración, por lo que se tiene condiciones favorables para la recarga. Por otro lado, en los últimos 25 años se tuvieron variaciones en el régimen de lluvias, uno con bajas precipitaciones, inferiores a la media de 1966-1975, otro con precipitación extraordinaria de 1976 a 1980 y el tercero de 1981 a 1988 con valores cercanos a la media.

3.- El acuífero está formado por material granular sedimentario marino aluvión y depósitos fluviales. La geometría del acuífero presenta depresiones hasta de 200 m de acuerdo a la geofísica, sin embargo en extensión son pequeños, en general el acuífero es de poco espesor con profundidad promedio de 50 mts. La base es de material arcilloso, y existe un alto arcilloso que hace independientes el valle de San Simón con la zona de San Quintín. Se tiene una gran cantidad de lentes arcillosos que en realidad provocan un semiconfinamiento, sin embargo, para fines prácticos de la simulación se considera como acuífero libre.

4.- La recarga se presenta fundamentalmente en los diferentes arroyos, se tiene dos componentes, uno cuando el agua precipitada se infiltra

en los materiales permeables de los cañones e ingresa al sistema como flujo subterráneo y otro cuando existan escurrimientos que al llegar a la planicie se infiltran, esto indica que el tiempo de llegada al sistema es diferente y difícil de medir por falta de información. En la zona costera también hay dos componentes, la precipitación que se infiltra a través de los materiales arenosos (dunas) o en zonas someras y un flujo subterráneo de agua marina inducido por la sobreexplotación, estas componentes también son difíciles de cuantificar por no tener un monitoreo adecuado de análisis físicoquímicos.

5.- La descarga actual en la zona de San Quintín es exclusivamente por bombeo, en cambio en San Simón, de acuerdo a las equipotenciales, se denota un flujo subterráneo hacia el mar en los años que se ha recuperado, por lo que su funcionamiento es muy dinámico.

6.- Se tomaron como condiciones iniciales las elevaciones piezométricas correspondientes a una configuración supuesta para condiciones naturales sin explotación, cuya fecha probable es 1940.

7.- Se consideraron condiciones de límite impermeable al contacto del acuífero con los conglomerados que forman una serie de mesas, así como a los materiales volcánicos al oeste del área. La frontera de carga constante se localiza en la zona costera, al noroeste y al suroeste del área simulada.

8.- Los volúmenes de extracción varían mucho con el tiempo, ya que los pozos están equipados con motores de combustión interna, cuyo régimen de operación es incierto; por otro lado, el cálculo es mediante un aforo instantáneo multiplicado por el tiempo de operación que pocas veces se conoce con precisión. Indebidamente los reportes actuales mencionan extracciones en forma global, por lo que se propone a futuro se reporten en tres zonas fundamentales, a) Cañon de San Simón, b) Valle de San Simón y c) Zona de San Quintín.

9.- La configuración del nivel estático más antigua es de 1971, que tenía un cono de abatimiento hasta 12 metros bajo el nivel del mar, lo que indica que la descarga superó a la recarga unos años antes, pero para estas fechas la salinidad aún no avanzaba tierra adentro, por lo que la sobreexplotación fue a costa del almacenamiento hasta 1974 aproximadamente, donde ya se manifiesta intrusión marina.

10.- La recarga del acuífero está ligada directamente al régimen de las precipitaciones, por lo que es difícil cuantificarla con precisión. Sin embargo los mejores años fueron de 1978 a 1981, en donde el valle y cañon de San Simón tuvieron una recuperación total del acuífero, en cambio en la zona de San Quintín solo tuvieron recuperación parcial enfrente de los cañones.

11.- El proceso de calibración tiene como finalidad la comprobación de que el sistema simulado responda a las acciones externas de forma paralela a la realidad, sin embargo, se dificulta por diversas razones.

a) Por ser un acuífero libre tiene una gran sensibilidad a la recarga que se presenta en forma muy errática y por falta de información se tuvo que estimar para periodos relativamente largos como un promedio.

b) Es igualmente sensible a la extracción y también tiene una gran diversidad en cantidad y distribución, pues las características propias de los equipos pueden cambiar de un año a otro, así como el abandono y/o perforación de nuevos pozos, sin que se tenga un control de cuando se llevaron a cabo y que volúmenes extraen.

c) Las elevaciones del nivel estático tienen grandes deficiencias porque la nivelación de brocales fueron hechas en 1974, 1978 y 1983, sin embargo, a través del tiempo la obra se destruye y la reponen, tiene el mismo número pero ya no es la misma obra, y ni siquiera hay un control de la numeración, por lo que las piezometrias realizadas

pueden tener confusión.

12.- La calibración se llevó a cabo usando la mayor cantidad de información disponible para los coeficientes hidrodinámicos, utilizando pruebas de bombeo, cortes litológicos, espesor saturado y caudal específico. El coeficiente de almacenamiento se adoptó el calculado por ICG,S.A. de 0.07 y la hidrometría de 1988 y 1978, estimándose para 1971.

13.-Para calibrar los parámetros físicos se realizaron 3 corridas partiendo de condiciones iniciales (1940), sin recarga para amplificar el efecto, y extracciones de 1971,78 y 88 respectivamente. Se atribuye que para un periodo largo el efecto del bombeo debe ser similar al efecto real; la forma de los conos de abatimiento, así como su posición deben ser localizados en el mismo lugar, aunque numéricamente no sean iguales a los reales. Con estas consideraciones se hicieron las modificaciones preliminares a los parámetros hasta lograr una correspondencia lógica de los efectos del bombeo. También se realizó una simulación en régimen establecido para condiciones iniciales, que corroboró la confiabilidad de los datos. Finalmente se procedió a una simulación con datos reales de diciembre de 1971 a febrero de 1981, considerando la extracción de $23 \text{ mm}^3/\text{año}$, recarga en los cañones de $12.6 \text{ mm}^3/\text{año}$ y en la zona costera de $11.0 \text{ mm}^3/\text{año}$, lográndose una coincidencia aceptable de la realidad con los datos simulados, por lo que se puede concluir que la calibración es aceptable.

14.- De las tres alternativas analizadas se obtienen mejores resultados con la número 3, ya que recupera más rápidamente los niveles en la zona costera; la reducción es razonable ya que con $100,000 \text{ m}^3$ anuales por aprovechamiento se pueden cultivar 16.6 has., con una lamina de 60 cm, y se incrementaría aproximadamente a 40 has. con sistemas de riego por goteo, lo que obliga a realizar un uso eficiente del agua.

RECOMENDACIONES

1.- Realizar un censo completo del "valle de San Quintín", con el fin de crear un padrón de usuarios, en donde se recomienda respetar la numeración existente y que por obligación del usuario este número se ponga en un lugar fijo y visible. De esta forma se puede llevar un control sobre nuevas perforaciones y/o cambios de equipos, cuya práctica en Baja California es muy frecuente.

2.- La reglamentación de la extracción del agua subterránea es la alternativa administrativa-legal, que permitiría recuperar parcialmente los niveles el acuífero. El reglamento debe contemplar, entre otras cosas, la reducción del volumen como alternativa inmediata considerando los siguientes aspectos:

a).- Las alternativas de explotación del modelo fueron hechas con las estimaciones de extracción y recarga de 1988, por lo que en caso de continuar este régimen de operación, se recomienda aplicar la alternativa No. 3 para la zona de San Quintín, y en el valle y Cañon de San Simón se debe reducir un 25% el volumen de extracción.

b).- En el caso de que al realizarse el padrón de usuarios, resultara un número mayor de aprovechamientos activos del considerado en este trabajo, se debe aplicar criterios de reducción, que en global no excedan de 14 millones de metros cúbicos anuales en la zona de San Quintín; de $10 \text{ Mm}^3/\text{año}$ en el valle de San Simón y de $8.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ en el cañon de San Simón.

3.- Cualquier medida de control adoptada, no es posible llevarla a la práctica si no se cuenta con información fidedigna de la extracción por aprovechamiento, por lo que es obligación del usuario instalar medidor de flujo. De no llevarse esta medida a la práctica se continuará con la incertidumbre en la extracción y en consecuencia no se podrá llevar un control del recurso.

4.- Se recomienda manejar en lo sucesivo la información de la extracción en tres zonas. A) Zona de San Quintín, B) valle de San Simón y C) cañon de San Simón.

5.- De acuerdo al período de lluvias, se recomienda tomar lecturas de piezometría en todo el Valle en dos fechas; una en el mes de marzo y otra en octubre. En los Cañones se recomiendan las lecturas cuando menos mensuales, par conocer la dinámica de la recarga.

6.- Escoger pozos piloto en la zona costera para conocer las variaciones de la salinidad. no es necesario realizar análisis fisico-químicos, unicamente con la conductividad eléctrica se puede estimar el contenido de sólidos totales disueltos.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- INGENIERIA Y GEOTECNIA, S.A. "ESTUDIOS GEOMORFOLOGICOS EN LOS VALLES DE SAN QUINTIN, MANEADERO, LAS PALMAS Y LA MISION, B.C." SARH, 1971.
- 2.- TECNICAS MODERNAS DE INGENIERIA S.A." ESTUDIO GEOMORFOLOGICO DEL VALLE DE SAN QUINTIN EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE," SARH, 1974.
- 3.- TECNICAS MODERNAS DE INGENIERIA S.A. "INFORME FINAL DEL ESTUDIO GEOFISICO EN EL VALLE DE SAN QUINTIN", SARH, 1976.
- 4.- INGENIEROS CIVILES Y GEOLOGOS ASOCIADOS S.A. "ESTUDIO DE FACTIBILIDAD HIDROLOGICA EN SAN QUINTIN Y MANEADERO", SARH, 1978.
- 5.- RESIDENCIA GENERAL DE ADMINISTRACION Y CONTROL DE SISTEMAS HIDROLOGICOS, B.C. SARH. "CONDICIONES GEOMORFOLOGICAS ACTUALES DEL VALLE DE SAN QUINTIN, MUNICIPIO DE ENSENADA". FEBRERO, 1987.
- 6.- INGENIERIA Y CONSTRUCCIONES RACIONALES, S.A. DE C.V. "INFORME PRELIMINAR DE LA ACTUALIZACION DE CONDICIONES GEOMORFOLOGICAS DEL VALLE DE SAN QUINTIN", 1989.
- 7.- PRICKETT T.A. Y C.G. LONQUIST. "METODOS DE ORDENADOR PARA EVALUACION DE RECURSOS HIDRAULICOS SUBTERRANEOS." (Traducido por Bernardo Lopez Camacho y Jesús Lopez Garcia del Illinois State Water Survey, Urbana, Bulletin 55, 1971) Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Obras Hidráulicas, España, 1976.
- 8.- ING. JORGE JIMENEZ LOPEZ "INSTRUCTIVO PARA LA DETERMINACION DEL TIPO DE CLIMA DE ACUERDO AL SEGUNDO SISTEMA DE THORNTHWAITTE". SARH. DIC. 1972.
- 9.- GEOLOGIA DE LA REPUBLICA MEXICANA. ING. DANTE J. MORAN ZENTENO. COEDICION POR CONVENIO, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA Y LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. 2a. EDICION, MEXICO D.F., 1985.
- 10.- "CURSO DE MODELOS DIGITALES EN HIDROLOGIA SUBTERRANEA, PROBLEMAS DE FLUJO Y CONTAMINACION". Expositores, Carrera, Jesús/Chavez, Adolfo/Martínez, Pedro/Semper, Javier/Usunoff, Edeuardo. Tomo I y II. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Residencia General de Geomorfología y Zonas Áridas.

- 11.- HIDROLELEGR0, S.C. "ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACION DE LAS MICROCOMPUTADORAS A LA GE0HIDROLOGIA", SARH, INTA, 1988.
- 12.- SERVICIO GEOLOGICO BOLETIN N. 37 " TEORIA BASICA DE MODELOS ANALOGICOS Y DIGITALES DE ACUIFEROS" Ministerio de Obras P6blicas, Direcci6n General de Obras Hidr6ulicas, Espa1a 1972.
- 13.- JAIME A. TINAJERO GONZALEZ. "APUNTES DE ASPECTOS FUNDAMENTALES EN EL ESTUDIO DE AGUA SUBTERRANEA" (GE0HIDROLOGIA). Facultad de Ingenieria , U.N.A.M. , M6xico, 1985.
- 14.- LOHMAN S.W. "HIDRAULICA SUBTERRANEA", (traducido por Fernando Anguita Bartolom6), Editorial Ariel, Espa1a, 1977.
- 15.- CUSTODIO/LLAMAS. "HIDROLOGIA SUBTERRANEA", Vol. 1 y 2. ED. OMEGA. BARCELONA ESPANA, 1983.
- 16.- CARTA HIDROLOGICA DE AGUAS SUPERFICIALES Y CARTA GEOLOGICA, HOJA "LAZARO CARDENAS " , CLAVE H11-5-6, Escala 1:250 000, INEGI, SPP, M6xico 1981.
- 17.- INVENTARIO DE APROVECHAMIENTOS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEOS PARA RIEGO, B.C.M., SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS, DIRECCION DE PEQUE1A IRRIGACION, MEXICO D.F., 1967.