



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO SONORA (2624), ESTADO DE
SONORA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1	GENERALIDADES.....	2
	Antecedentes	2
1.1	Localización.....	2
1.2	Situación administrativa del acuífero.....	5
2	ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3	FISIOGRAFÍA.....	6
3.1	Provincia fisiográfica.....	6
3.2	Clima.....	8
3.3	Hidrografía.....	9
3.4	Geomorfología.....	12
4	GEOLOGÍA.....	13
4.1	Estratigrafía.....	13
4.2	Geología Estructural.....	17
4.3	Geología del subsuelo	19
5	HIDROGEOLOGÍA.....	20
5.1	Tipo de acuífero	20
5.2	Parámetros hidráulicos.....	20
5.3	Piezometría	21
5.4	Comportamiento hidráulico.....	22
5.4.1	Profundidad al nivel estático.....	22
5.4.2	Elevación del nivel estático.....	23
5.4.3	Evolución del nivel estático	25
5.5	Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	27
6	CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	30
7	BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	32
7.1	Entradas y Salidas	32
8	DISPONIBILIDAD	50
8.1	Recarga total media anual (R).....	51
8.2	Descarga natural comprometida (DNC).....	51
8.3	Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	51
8.4	Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	51

1 GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua.

Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1 Localización

El acuífero Río Sonora, definido con la clave 2624 por la Comisión Nacional del Agua se encuentra localizada en la porción norcentral del Estado de Sonora.

Limita al norte, con las Sierras Azul, El Manzanal, Los Ajos y Buenos Aires; al sur, con la Presa El Molinito y Las Sierras Santa Teresa y Mazatán; al oriente, con las Sierras Igualama, Pinta, Verde, El Bellotal y Santa Margarita; y al poniente, con las Sierras Cobriza, Cucurpe, Madera y Méndez.

El acuífero, abarca parcialmente los municipios de Arizpe, San Felipe de Jesús, Aconchi, Banámichi, Huépac, Baviácora, Ures, y Hermosillo (figura 1).

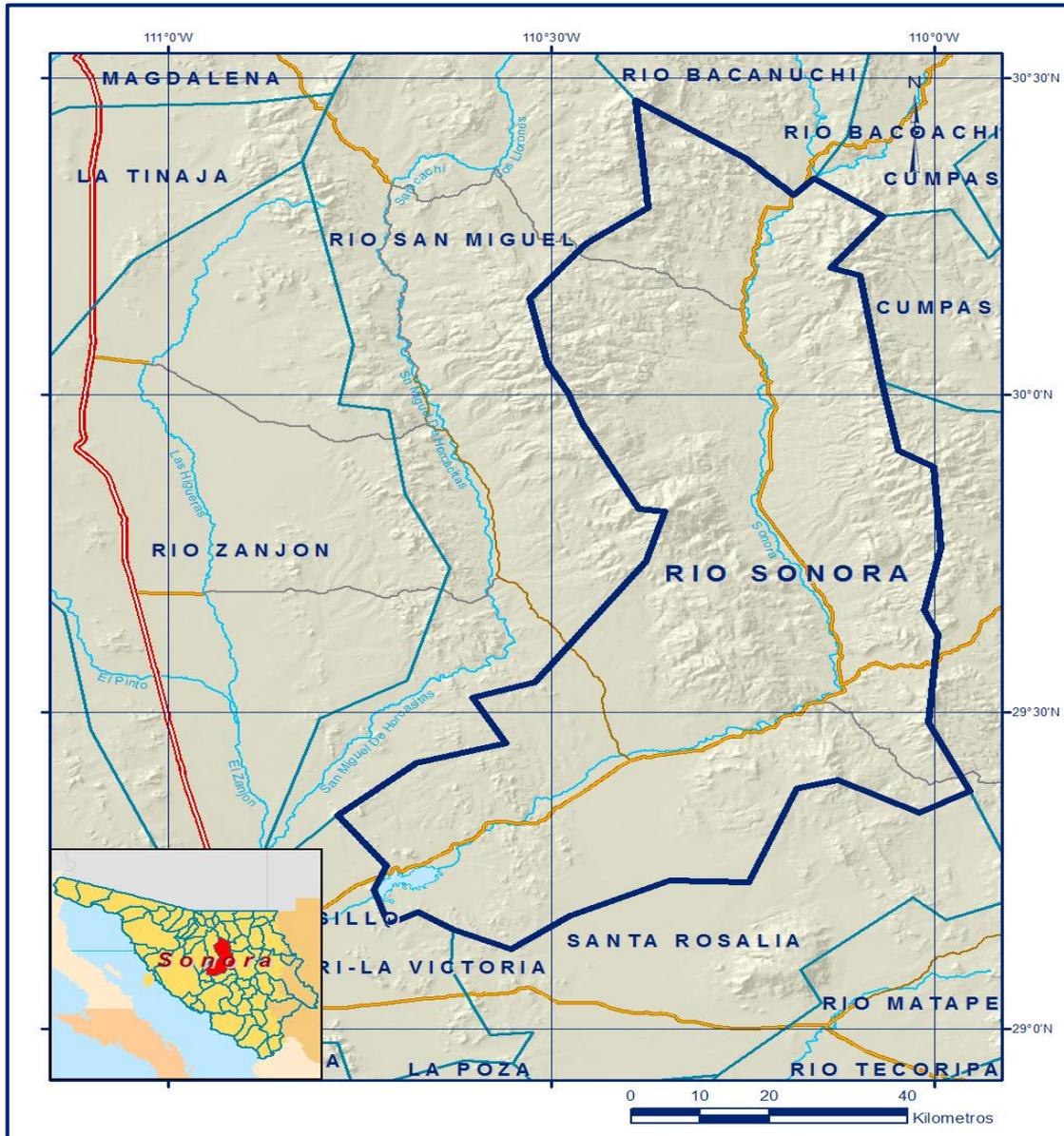


Figura 1. Localización del acuífero

Dentro de la cuenca del Río Sonora se encuentran las poblaciones de Arizpe, San Felipe de Jesús, Aconchi, Banámichi, Huépac, Baviácora y Ures, así como poblaciones menores como La Estancia, Ranchito de Huépac, San José de Baviácora, Mazocahui, San Pedro de Ures, San José de Ures, Topahue y Molino de Camou. La población global se calcula en 22,937 habitantes, según cifras del INEGI del año de 1995, sin contar la población de Hermosillo, de 545,000 habitantes para ese año.

La razón de no incluir a la población del municipio de la ciudad capital es que no es muy impactante para este acuífero. El área cubre íntegramente la cuenca alta del Río Sonora. Tiene una superficie total de unos 12,615 km² La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 2624 RIO SONORA						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	110	4	5.6	30	16	55.8
2	110	8	9.8	30	12	18
3	110	5	51.5	30	11	16.6
4	110	4	8.4	30	1	13.3
5	110	2	51.4	29	54	44.9
6	110	0	5.6	29	53	11.6
7	109	59	29.5	29	45	34.4
8	110	0	50.0	29	39	40.1
9	109	59	43.8	29	37	21.4
10	110	0	28.6	29	29	10
11	109	57	14.2	29	22	28.4
12	110	1	11.4	29	20	28.8
13	110	7	32.6	29	23	31.5
14	110	10	46.7	29	22	47.1
15	110	14	31.0	29	13	55.5
16	110	20	44.2	29	14	5.1
17	110	28	33.0	29	10	44.2
18	110	33	8.4	29	7	32.0
19	110	37	39.4	29	9	25.1
20	110	40	24.4	29	11	17
21	110	42	42.6	29	9	55.6
22	110	43	52.7	29	13	10.1
23	110	42	54.2	29	15	25.3
24	110	46	42.8	29	20	16.2
25	110	40	31.4	29	25	13.3
26	110	33	33.5	29	27	5.0
27	110	36	7.7	29	31	22.1
28	110	31	18.7	29	32	47.4
29	110	22	35.1	29	44	14.0
30	110	21	5.4	29	48	59.7
31	110	23	10.8	29	49	12.6
32	110	27	31.1	29	57	15.2
33	110	28	40.7	30	0	13.1
34	110	30	19.3	30	3	13
35	110	31	42.3	30	9	6.6
36	110	27	17.0	30	14	19.8
37	110	22	25.0	30	17	43.4
38	110	23	26.0	30	27	52.2
39	110	14	51.6	30	22	25.2
40	110	11	5.3	30	18	55.2
41	110	9	25.0	30	20	27.8

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Sonora se encuentra dentro de la zona de veda publicada en el Decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación del 2 de junio de 1967, para la apertura de nuevos aprovechamientos de aguas subterráneas. Esta disposición fue ratificada en el Decreto de fecha 19 de septiembre de 1978. Aparte de la disposición oficial señalada en el inciso anterior, no existen declaratorias de reserva o reglamentos internos.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 2.

Los usuarios del sector agrícola del acuífero Río Sonora son en su mayoría ejidales; se encuentran afiliados a Organizaciones Campesinas como la CCI, CNC, etc. La SAGAR, brinda apoyo Técnico agropecuario a estos usuarios en forma permanente a través Centros de apoyo. Por otra parte, la Comisión Nacional del Agua, ha venido sosteniendo reuniones con los distintos usuarios del agua para la Integración del Consejo de Cuenca el cual forma parte del Consejo del Alto Noroeste.

La zona de este acuífero queda dentro de la jurisdicción de los Distritos de Desarrollo Rural No 144.-Hermosillo y 142-Ures, dependiente de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Estructuralmente, la SAGAR cuenta con la oficina del distrito de Desarrollo Rural con sede en la población de Ures, además de Centros de Apoyo Técnico en Carbó.

La propia Dependencia ha organizado a los usuarios del sector agrícola en Unidades de Riego, las cuales se benefician obras de aguas subterráneas como norias y pozos someros. Estas Unidades se localizan a lo largo de todo el Río en Baviácora, Banámichi, Huepac, Aconchi, San Felipe de Jesús, etc.

El mayor usuario de este acuífero está representado por el uso agrícola, seguido por el uso público urbano de las poblaciones descritas anteriormente y finalmente por los usuarios del sector pecuario.

2 ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la cuenca del Río Sonora se han realizado los siguientes estudios:

En el año de 1970, la Secretaría de Recursos Hidráulicos llevó a cabo el estudio denominado **“Estudio de Hidrología superficial de los valles de los Ríos San Miguel, Sonora, Zanjón, Bacoachi y Mátape, Sonora”** por la Compañía Ariel Construcciones, S.A.

En el mismo año de 1970, la Secretaría de Recursos Hidráulicos llevó a cabo el estudio denominado **“Censo de Aprovechamientos Hidráulicos (superficiales y subterráneos) en los valles del Río Sonora, desde Mazocahui hasta Arizpe, Sonora”** por la Compañía Ariel Construcciones, S.A.

Finalmente, en el año de 1977, la secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos encomendó a la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería el estudio denominado Informe Final del **“Estudio geohidrológico de las cuencas Altas de los Ríos Sonora, Zanjón y San Miguel”**, que se llevó a cabo en el año de 1977.

3 FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

La Cuenca Alta del Río Sonora, se ubica en las provincias fisiográficas de la Zona Desértica de Sonora y la Sierra Madre Occidental (Manuel Alvarez Jr., 1958), cubriendo una superficie de 21,195 km², que comprende las cuencas hidrográficas de los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón.

Esta última provincia fisiográfica en su porción norte, está dividida en tres subprovincias o zonas, que la separan longitudinalmente. Estas son, de oriente a occidente:

- 1) la Zona de Altiplanicie,
- 2) la Zona de Barrancas
- 3) la Zona de Sierras y Valles Paralelos.

Siendo en esta última, donde se ubica la porción oriental del área de estudio y que fue descrita por Erwin Raisz en 1959, de la siguiente forma: “La zona presenta cadenas de montañas longitudinales, que están separadas por valles paralelos intermontanos menos extremos. Las cadenas montañosas están compuestas por rocas metamórficas y sedimentarias, coronadas de lavas e intrusionadas por granito y otras rocas plutónicas. Los valles están cubiertos por conglomerados del Terciario Superior y rellenos fluviales y aluviales del Cuaternario”.

De estos valles, el de mayor elevación es el correspondiente al del Río Sonora, con una altura promedio del orden de los 600 metros; hacia el occidente, el marco estructural define un bajo tectónico donde se ubica el valle del Río San Miguel 50 metros abajo en relación con el techo del valle del Río Sonora. Continuando hacia el occidente, la zona exhibe el “graben” del Río Zanjón enmarcado entre las sierras La Cobriza, Méndez, La Pala y Cerro Tabique.

Además de las grandes fallas longitudinales que dieron lugar a la formación de los valles, existen algunas secundarias de dirección Este-Oeste que tienen su mayor expresión en la cuenca del Río Sonora; son precisamente estas fallas, las que propician los estrechamientos y controlan el sistema de drenaje de muchos arroyos y el propio cauce del Río Sonora.

Tal como se expuso anteriormente, los valles de los ríos mencionados, se encuentran separados entre sí por sierras de altura media de aproximadamente 1,200 metros sobre el nivel del mar, aunque llegan a alcanzar alturas de hasta 2,400 metros en algunas sierras como en la del Manzanal y de los Ajos, localizadas en la cabecera de la cuenca del Río Sonora. En la porción centro-norte sobresalen otras elevaciones, como la del Cerro de la Canela, con 2,100 metros sobre el nivel del mar. Existen otros accidentes topográficos de menor elevación, como son los Cerros del Placer y de la Bandera con alturas de 800 a 940 metros sobre el nivel del mar, respectivamente, localizados en la porción occidental.

En conjunto, las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en el área de estudio están representadas por valles, sierras y terrazas. Los valles están constituidos por materiales de relleno Terciarios y Cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas por los conglomerados de la Formación Báucarit (King, 1939).

La Subcuenca del Río Sonora es la de mayor desarrollo, ya que ocupa una superficie de unos 1,500 km²; tiene su límite natural en la estribación norte de la Sierra Madre Occidental, iniciándose el desarrollo del río en las inmediaciones de la Ciudad de Cananea en un punto denominado Ojo de Agua de Arballo, uniéndose aguas abajo numerosos escurrimientos que se forman en el flanco oriental de la Sierra del Manzanal y los del flanco occidental de la Sierra de los Ajos. Nace a una altitud de 1,970 metros sobre el nivel del mar.

Siguiendo en curso sensiblemente norte-sur hasta la población de Mazocahui; de aquí hasta su confluencia con el Río San Miguel el cauce del río ha labrado los valles de Ures y Topahue, cortando tres estrechamientos de rocas intrusivas y metamórficas, escurriendo con un drenaje de tipo rectangular, debido al control estructural del área.

3.2 Clima

El análisis climatológico se efectuó por medio de los datos de precipitación pluvial, temperatura y evaporación, registrados en 17 estaciones climatológicas, de las cuales 11 se encuentran localizadas dentro del área de estudio y las 6 restantes fuera de ella.

Con base en la información disponible, se seleccionó el período 1960-1976; el cual comprende los últimos 16 años. Para intervalo de tiempo se efectuó el análisis de la precipitación, la temperatura y la evaporación del área.

Este análisis, se llevó a cabo para la superficie total de estudio y también para cada una de las subcuencas que integran el área.

El método utilizado fue básicamente el de Polígonos de Thiessen, aunque también se construyeron las isoyectas e isotermas anuales con el objeto de conocer la distribución de la lluvia y la temperatura media anual en el área de estudio.

Para el período 1960-1976, la temperatura media anual en el área de estudio varía de unos 17° C en la cabecera de la cuenca del río Sonora, a unos 24° C en las inmediaciones de la Ciudad de Hermosillo.

En términos generales las temperaturas más bajas corresponden a las zonas montañosas y las más altas a la zona de planicie en la Mesa del Seri.

La temperatura media anual del área de estudio es de unos 21° C, registrándose la más alta temperatura en la estación climatológica Abelardo L. Rodríguez (24.2° C); y la más baja, en la estación Cananea (16.3° C) localizada en el extremo norte del área.

La temperatura cálida se presenta de Junio a Septiembre con temperaturas medias entre 27 y 31° C; y la temporada fría, se presenta durante los meses de Diciembre y Enero, con temperaturas medias entre 12.8 y 14.6° C.

La precipitación media anual del área de estudio en el período 1960-1976 fue de 400.6 mm. Las precipitaciones promedio registradas en las estaciones climatológicas, varían entre 268.6 y 542.6 mm/año, presentándose las más altas en las estaciones Cananea (504.6 mm) y Mazatán (542.6 mm) localizadas en los límites hidrográficos norte sureste respectivamente.

Las más bajas precipitaciones se registran en la subcuenca del río Zanjón: estación Querobabi 268.6 mm y estación Carbó 294.3 mm. En la estación Presa Abelardo L. Rodríguez también se registró una de las más bajas precipitaciones anuales: 273.3 mm.

De acuerdo con el número y distribución de las estaciones climatológicas las más representativas por su área de influencia y por su precipitación media anual más próxima a la media anual del área de estudio son:

Subcuenca Río San Miguel.- La precipitación media anual de esta subcuenca en el período 1970-1976 fue muy próxima a la del río Sonora, alcanzó una altura de precipitación de 421.0 mm, siendo la estación Cucurpe la más representativa.

Subcuenca Río Zanjón.- En esta subcuenca se presentan las lluvias más bajas del área de estudio. La precipitación media anual para el mismo período 1960-1976 fue de 311.8 mm, siendo la estación Carbó la más representativa de la subcuenca.

La mayoría de las estaciones climatológicas del área de estudio, no miden la evaporación potencial. Sin embargo, de acuerdo con la información disponible en algunas de ellas, se estima que la evaporación potencial es de unos 2400 mm/año.

3.3 Hidrografía

El acuífero Río Sonora queda comprendido dentro de la Región Hidrológica RH-8, Sonora Norte. El acuífero Río Sonora, se ubica dentro de la cuenca 8D-Río Sonora. La subcuenca hidrológica a la que pertenece este acuífero es la del propio Río Sonora en toda su extensión.

De acuerdo con la clasificación hidrológica que se dispone para esta zona, no se tiene información sobre subregiones hidrológicas. El dren principal del área de estudio, es el Río Sonora, el cual tiene su origen en la parteaguas con el Río Bavispe, a una elevación de 2400 msnm, en la Sierra de Magallanes a 32 km al oriente de Cananea.

Su rumbo general en la cuenca alta es hacia el sur, donde recibe como único afluente de importancia al Río Bacanuchi, el que se origina en el parteaguas con el arroyo Cocóspera de la cuenca del Río Magdalena, a una elevación de 2,480 msnm y que confluye por la margen derecha al Río Sonora, aguas debajo de Taquichopa, Son., y a 780 m de elevación Aguas arriba de Ures confluyen por la margen derecha e izquierda del Río Sonora, los arroyos Zolibiate y La Salada. Aguas abajo y a una elevación de 270 msnm se une por la margen izquierda el arroyo de La Junta, el que tiene su origen a una elevación de 1,700 msnm en el parteaguas con el Río Moctezuma de la cuenca del Río Yaqui.

Sigue su rumbo general hacia el oriente aguas debajo de esta confluencia y a 3.5 km aproximadamente, se encuentra la estación hidrométrica El Oregano, en la que se ha observado un escurrimiento medio anual de 98.7 millones de m³, para el período 1945-1975. El Río no es de régimen perenne ya que al final del período de estiaje deja de escurrir superficialmente, el gasto máximo instantáneo registrado es de 955 m³/seg. Y el mínimo 0.0.

El volumen medio anual escurrido es de 98.7 millones de m³, con un máximo de 270.6 millones de m³/año y un mínimo de 16.57 millones de m³/año, como se puede apreciar, existe una fuerte variabilidad en el volumen escurrido, el coeficiente de variación del volumen escurrido es de 0.57. Los hidrogramas en papel semilogarítmico de gastos medios diarios (escala, logarítmica) contra tiempo donde se determinaron los períodos de recesión o descenso del flujo base del río. Durante el período de estiaje el escurrimiento superficial sigue una ley exponencial del tipo

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (a)$$

Donde:

Q_t es el caudal en el instante t en función del caudal Q_0 en un instante t_0 anterior, tomado como origen el período de recesión

Es el coeficiente de decaimiento igual a:

$$\alpha = \frac{\ln Q_0 / Q_t}{t}$$

La fórmula (a) puede escribirse bajo la forma:

$$\text{Log } Q_t = \text{Log } Q_0 - \text{Log } e$$

Que muestra que en coordenadas semilogarítmicas la curva de descenso está representada por líneas rectas.

En el período de recesión se detectaron dos rectas, la primera que comprende de fines de Octubre a Marzo, cuya pendiente de descenso es muy suave debido a las lluvias invernales que se efectúan durante este período y que sostienen el flujo superficial. Del mes de Marzo a Junio la pendiente de la recta se vuelve más fuerte hasta que llega a agotarse el escurrimiento superficial.

El período que se consideró para el período de estiaje fue el segundo tramo con una duración promedio de 94 días y un volumen medio escurrido de 0.8 millones de m³. El volumen de flujo base que contribuye al escurrimiento anual en un porcentaje muy bajo, únicamente aporta el 1.6% del escurrimiento superficial.

A la altura de la presa Abelardo L. Rodríguez, confluye al Río Sonora su aportador más importante, el Río San Miguel, cuya cuenca tiene una superficie de 8.427 km² que representa el 40% del área drenada hasta la presa, tiene sus orígenes en el parteaguas con el arroyo Cocóspera, en la Sierra Azul, a una elevación de 1,200 msnm; y su curso general es hacia el sur, el que descarga por su margen derecha, aguas arriba del sitio en que actualmente se localiza la cortina de la presa.

Los escurrimientos del Río Sonora a la altura de la Presa Abelardo L. Rodríguez se determinaban antes de la construcción de ésta, por la suma de los escurrimientos registrados en la estación hidrométrica de Hermosillo, situados en el Río y sobre el Canal Principal.

El escurrimiento medio anual total observado fue de 216.2 millones de m³, para dos años de información (1945 y 1946). La avenida máxima fue de 1240 m³/s. Y el gasto mínimo de 0.68 m³/s. El hidrograma para Julio de 1944 a Abril de 1947 que es la única historia hidrométrica del escurrimiento superficial antes de ser construida la presa. Se determinó que en esta porción del río el régimen de escurrimiento es perenne.

El volumen escurrido durante el período de recesión se estimó del orden de 28.7 millones de m³, y, contribuye con el 12% del volumen total escurrido.

Comparando el volumen de flujo base entre las estaciones hidrométricas El Orégano y Hermosillo para los mismos años, se nota que para períodos homogéneos en tiempo (180 días considerados de la Estación Hermosillo), por la estación El Orégano pasarán 2.4 millones de m³, contra los 28.7 millones de m³ que se registran en la Estación Hermosillo, que equivale a un incremento de 26.3 millones de m³ en la Estación Hermosillo.

Si se considera un tiempo de duración del flujo base igual al registrado en la Estación El Orégano de 150 días, bajo la condición de contabilizar el volumen escurrido en el período de invierno, se tiene un volumen escurrido en la Estación El Orégano es de 2 millones de m³, mientras que en la Estación Hermosillo se registra un volumen de 23.9 millones de m³.

Como se puede apreciar, existe una alimentación de 1690 lps. Entre las estaciones El Orégano y Hermosillo, debido posiblemente a la alimentación del Río San Miguel de Horcasitas.

La infraestructura hidráulica que se tiene en este acuífero consiste de obras de captación de agua subterránea del tipo norias en su mayoría y pozos someros, algunos manantiales obras de toma directa del río. Las norias y pozos someros se utilizan para fines agrícolas, domésticos y pecuarios. Hacia la parte baja del acuífero, se localiza la presa “El Molinito” la que funciona como límite de este acuífero con el acuífero Mesa del Seri-La Victoria. Más al poniente de éste, se encuentra la presa Abelardo L. Rodríguez”.

3.4 Geomorfología

El área considerada, se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de una serie de sierras y lomas paralelas, con orientación Noreste-Sur y separadas entre sí por valles angostos.

Los valles están constituidos por materiales de relleno Terciarios y Cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórfica; y las terrazas, por conglomerados de la formación Báucarit.

En conjunto, las principales formas morfológicas que se encuentran expuestas en el área de estudio están representadas por valles, sierras y terrazas.

Los valles están constituidos por materiales de relleno Terciarios y Cuaternarios; las sierras por rocas intrusivas, sedimentarias, volcánicas y metamórficas y las terrazas por los conglomerados de la Formación Báucarit (King, 1939).

La Subcuenca del Río Sonora es la de mayor desarrollo, ya que ocupa una superficie de unos 1,500 km²; tiene su límite natural en la estribación norte de la Sierra Madre Occidental, iniciándose el desarrollo del río en las inmediaciones de la Ciudad de Cananea en un punto denominado Ojo de Agua de Arballo.

Uniéndose aguas abajo numerosos escurrimientos que se forman en el flanco oriental de la Sierra del Manzanal y los del flanco occidental de la Sierra de los Ajos.

Nace a una altitud de 1,970 metros sobre el nivel del mar, siguiendo en curso sensiblemente norte-sur hasta la población de Mazocahui; de aquí hasta su confluencia con el Río San Miguel el cauce del río ha labrado los valles de Ures y Topahue, cortando tres estrechamientos de rocas intrusivas y metamórficas, escurriendo con un drenaje de tipo rectangular, debido al control estructural del área.

4 GEOLOGÍA

4.1 Estratigrafía

Para la clasificación estratigráfica de las rocas expuestas y agrupamientos en unidades hidrogeológicas según su rango de permeabilidad y de la cual se hace su exégesis en el plano V.3, se utilizaron durante los reconocimientos hidrogeológicos de campo, criterios de interpretación basados en las características morfológicas (estructura) de las rocas, tipo y grado de erosión e intemperismo, arreglo de drenaje y en forma estimativa densidad; clasificación megascópica de campo y posición relativa entre formaciones.

De acuerdo a los tipos de roca y propiedades hidrogeológicas, en el área de estudio afloran rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, que abarcan en edad desde Paleozoico hasta el Reciente.

Una descripción estratigráfica muy completa y detallada de la región, se realizó como parte del Estudio Geohidrológico que la Compañía Ariel Constructores, S.A., efectuara en el año de 1970.

La distribución de las diferentes unidades litológica se presenta en la figura 2.

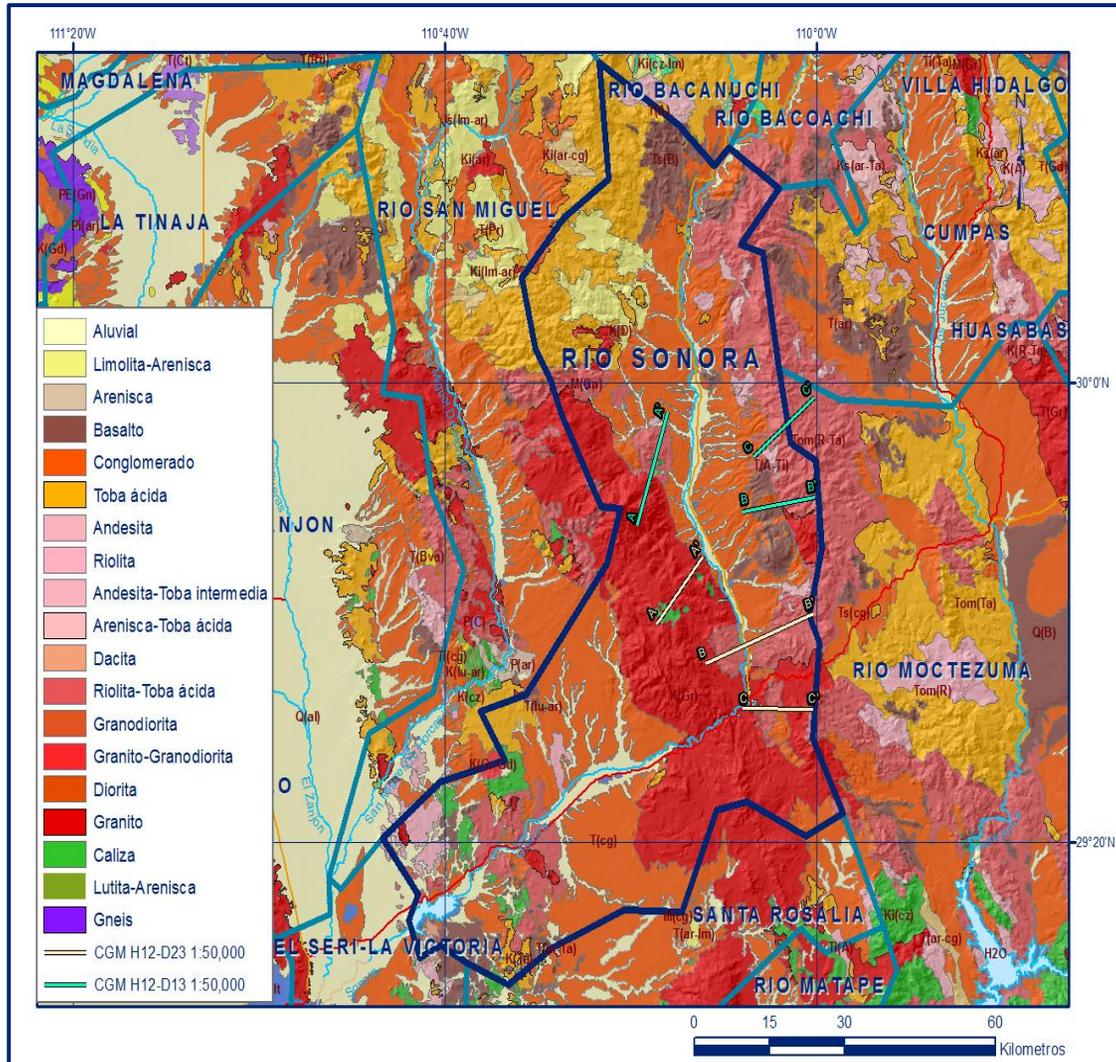


Figura 2. Geología general del acuífero

Aunque en dicho informe se describe la secuencia estratigráfica de la porción sur del área sujeta a investigación en este estudio, esta descripción es válida también para la porción norte, a excepción de algunas rocas metamórficas de Mesozoico que no fueron contempladas durante aquel levantamiento foto-geohidrológico y de algunos afloramientos de rocas triásicas del Grupo Barranca.

Por esta razón y atendiendo a los fines perseguidos, se realiza en el presente informe, una descripción estratigráfica muy generalizada y enfocada directamente al aspecto hidrogeológico. Tomando como base esta descripción, se agruparon las formaciones expuestas en grupos según su grado de permeabilidad.

PALEOZOICO

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio, son las correspondientes al tipo Paleozoico. Por su antigüedad, estas rocas se encuentran cubiertas por depósitos más jóvenes o muy erosionadas, por lo cual sus afloramientos se encuentran distribuidos en poca proporción con respecto a la columna geológica del área. Refiriéndose a éstas, en el estudio realizado por la Universidad Nacional, las nombra solamente como unidades del Paleozoico Metamórfico, en tanto que en el realizado en 1970, se les identifica como cuarcitas y calcarenitas con cierto grado de metamorfismo, que se indica en las calcarenitas por una marmolización.

Esta descripción coincide bastante bien con la que se realizó en el estudio elaborado por Carl Fries Jr. (1962), para Petróleos Mexicanos, en el que se refieren a ellas como capas de calizas con pedernal e intercalaciones de cuarcita y rocas pizarrosas correspondientes al Paleozoico Inferior.

Los afloramientos de la Era Paleozoica dentro del área de estudio, tienen su mayor expresión en el borde norte de la cuenca y en una línea de dirección sensiblemente norte-sur, siguiendo aproximadamente la traza del cauce del Río San Miguel; la ocurrencia de estos afloramientos Paleozoicos en una línea, se debe probablemente a los movimientos originados hacia fines del Mesozoico y principios del Terciario, que elevaron el bloque tectónico sobre el que se encontraban estos afloramientos, por lo que actualmente pueden encontrarse expuestos sobre una traza de falla. Por sus características físicas de compacidad, estas rocas son de naturaleza impermeable.

MESOZOICO

Sobreyaciendo a estas rocas del Paleozoico, se encuentran las correspondientes al Mesozoico, las que en el área de estudio tienen una distribución muy restringida y están representadas por sedimentos clásticos del Grupo Barranca, cuya edad ha sido asignada al Triásico y por calizas y areniscas del Cretácico Inferior. Los afloramientos de rocas triásicas se encuentran expuestas en el extremo noreste de la cuenca y los del Cretácico medio en su porción sur.

Hacia esta misma Era y hacia fines del Periódico Cretácico, tuvo lugar la aparición de las rocas plutónicas representadas por granitos y granodioritas que intrusionaron a las rocas Paleozoicas y a las correspondientes a la parte inferior y media del Mesozoico. Estas masas intrusivas tienen una extensa distribución en el área, sobre todo en la parte oriental y central donde forman cadenas montañosas.

El conjunto de rocas del Paleozoico y Mesozoico descritas en los párrafos anteriores, constituyen el basamento geológico regional; sobre ellas, se depositó una potente columna de sedimentos Cenozoicos, que transformó notablemente sus propiedades físicas debido al peso ejercido sobre ellas, anulando prácticamente la permeabilidad intersticial de los sedimentos y sellando las fracturas de los granitos y calizas.

CENOZOICO (TERCIARIO)

Dentro del área de estudio, son las rocas del Cenozoico las que tienen mayor distribución horizontal, ya que entre rocas sedimentarias y volcánicas cubren aproximadamente dos terceras partes de la superficie de la cuenca. Las rocas volcánicas están compuestas por emisiones lávicas de naturaleza ácida e intermedia como son riolitas y andesitas. Casi contemporáneo con estas emisiones lávicas, deben haberse sucedido las correspondientes a emisiones de piroclásticos finos que dieron lugar a la formación de las tobas volcánicas que afloran en la porción norte de la cuenca.

Dentro del grupo de rocas Cenozoicas, específicamente de la época Terciaria, se encuentran expuestos enormes espesores de conglomerados continentales de la Formación Baúcarit, nombrada así por King en 1939 y quién distinguió dos miembros en esta unidad; el superior, que consiste de arenas, arcillas y conglomerados poco consolidados y el inferior que se compone de conglomerados bien consolidados.

El miembro superior de esta formación tiene un marcado predominio de materiales arcillosos, formando paquetes que en ocasiones llegan a medir hasta 150 metros de espesor de acuerdo a la información obtenida de corte litológicos de pozos de explotación existentes y de los sondeos geoeléctricos realizados durante el presente estudio sobre la cuenca del Río Zanjón y en la porción oriental de la Presa Abelardo L. Rodríguez.

Es precisamente en la cuenca del Río Zanjón, y más específicamente en los alrededores de la población de Pesqueira, donde el conglomerado de la Formación Báucarit ha sido definido como un acuífero de medios granulares, en donde la distribución de las diferentes facies litológicas que la componen presentan una distribución horizontal y vertical caótica, cambiando en unas cuantas centenas de metros en forma horizontal de facies arcillosas y facies arenosas, de arenas y gravas y de gravas a arcillas.

Por estas características litológicas de la Formación Báucarit, se ha establecido dentro de ella dos acuíferos separados por las lentes ó las facies que muestran predominio arcilloso, dando lugar a la formación o definición de dos cargas piezométricas diferentes,

Una de ellas representativa de un acuífero confinado inferior y superiormente con elevación de la carga piezométrica mayor a la del acuífero libre alojado en los materiales Cuaternarios y otra carga piezométrica que actualmente muestra una diferencia de aproximadamente 10 metros con respecto al nivel estático del acuífero libre.

La producción de agua subterránea de este acuífero de conglomerados de la Formación Báucarit, es variable, debido a la heterogeneidad de la distribución espacial que presenta esta unidad hidrogeológica, pudiéndose comentar que los mejores caudales de producción se encuentran precisamente en el área de Pesqueira.

CENOZOICO (CUATERNARIO)

Sobreyaciendo a los conglomerados de la Formación Báucarit, se encuentran los depósitos aluviales y fluviales del Cuaternario; formados por boleos, gravas, arenas, arcillas y limos.

Tienen una distribución horizontal muy reducida, ya que se encuentran supeditados a los cauces de los ríos y arroyos y a las vegas y planicies de inundación de los mismos.

Estos materiales aluviales y fluviales del Cuaternario, constituyen un acuífero libre de alta transmisividad y de altos valores de caudales específicos, donde quedan alojadas la mayor parte de las obras de explotación de aguas subterráneas de la cuenca estudiada.

4.2 Geología Estructural

Formación de la Cuenca

Hacia fines del Cretácico y principios del Terciario, el paisaje geológico de la región estaba conformado por enormes plegamientos de rocas Paleozoicas, Triásicas y Cretácicas, que se extendían hacia el oriente, casi hasta la cuenca de Chihuahua. Hacia esa misma época, la Orogenia Laramide con su fase compresiva.

Dio origen a un proceso de afallamiento en bloques debilitando la corteza terrestre, lo que permitió intrusión de enormes masas de rocas graníticas que levantaron los bloques afallados.

Las profundas y extensas fisuras producidas por la deformación de la corteza terrestre, sirvieron de vía de escape a emisiones de lavas riolíticas y andesíticas que cubrieron con sus emisiones extensas superficies.

Al rejuvenecerse el paisaje y por el efecto de las pulsaciones de la gran revolución, se inició una intensa y prolongada etapa de erosión, que acumuló en las fosas tectónicas y sobre las tierras menos elevadas grandes espesores de conglomerados, arenas y arcillas que componen parte inferior de la Formación Báucarit.

Hacia la parte media del Terciario, Eoceno-Oligoceno, las últimas pulsaciones de la Revolución Laramide, propiciaron el asentamiento y nuevo afallamiento de los bloques tectónicos, formándose así el “graben” de la subcuenca del Río Zanjón, y los bajos tectónicos de los ríos San Miguel y Sonora.

La última etapa del proceso geológico de la región, está representada por un nuevo ciclo de erosión, cuyo mayor desarrollo se ubica dentro del Terciario, pues abarcó todo el Oligoceno y parte del Mioceno, cubriendo aproximadamente unos 30 millones de años; tiempo durante el cual tuvo lugar el depósito de la parte superior de la Formación Báucarit, bajo diversos ambientes de depósito y condiciones climatológicas alternadas de humedad y sequías prolongadas, que dieron como resultado, los cambios de facies litológicas que se encuentran expuestos en esta Formación, dentro los que destacan por su funcionamiento hidrogeológico, fuertes espesores de arcillas que producen un confinamiento hidráulico en algunos pozos de la zona de Pesqueira.

Con la información que se dispone sobre la geología del subsuelo en esta zona, parece lícito inferir que los paquetes arcillosos de hasta 100 metros de espesor que confinan los lentes arenosos ó antiguos cauces sepultados, tuvieron su origen en áreas bajas inundadas, hacía donde se acumularon materiales finos predominantemente.

Estas condiciones de depósito solo se han encontrado en esta zona, tal vez por ser ella donde se localizan los pozos más profundos de la subcuenca y donde existe mayor información sobre geología del subsuelo.

En el resto de la subcuenca no se cuenta con esta información, no pudiéndose asegurar que la zona de Pesqueira represente una anomalía local ó que, por el contrario, en toda la subcuenca existan a profundidad las mismas condiciones de depósito, lo cual podría esperarse dado que esta subcuenca fue la más baja de las tres. En las subcuencas de los ríos San Miguel y Sonora no se ha detectado esta condición hidrogeológica.

El término del depósito de la Formación Báucarit, en las postrimerías del Mioceno, marca el fin de los efectos de la Revolución Laramide, terminando la época Terciaria con emisiones de tobas riolíticas y andesíticas en el Plioceno.

Al abrirse el Cuaternario, ya se encontraba prácticamente delineado el sistema de drenaje actual, iniciándose el modelado del paisaje de las tierras altas y de corte y depósito sobre los valle rellenados de conglomerados, de depósitos aluviales y fluviales Cuaternarios, los que por el corto tiempo transcurrido desde el inicio de la Era, forman apenas una cubierta de poco espesor sobre el relleno Terciario.

4.3 Geología del subsuelo

Puede decirse que a lo largo del acuífero Río Sonora en el tramo comprendido aguas arriba de la Presa El Molinito y los estrechos valles de Ures, Mazocahi, Baviácora, Aconchi, Banámichi, Huepac y Arizpe, no se han realizado estudios de prospección geofísica.

Las captaciones de agua subterránea identificadas en el área son en su gran mayoría obras de escasa profundidad que captan las aguas someras del acuífero contenido en materiales de acarreo. Se sabe por estudios geofísicos aislados llevados a cabo por particulares, que en la zona de Ures se tiene un espesor de material permeable de unos 200 m; disminuyendo ligeramente en los valles altos de las localidades mencionadas, donde alcanzan espesores de unos 150 m. Lo que sí es cierto es que los materiales corresponden a clásticos gruesos de alta permeabilidad como los boleos y gravas gruesas, según se ha podido verificar en obras aisladas.

Otro factor de la falta de estudios a profundidad es que no ha sido necesaria su realización debido a que por una parte la demanda ha sido cubierta con las obras someras o bien mediante obras de tomas directamente del río, además de que las áreas de cultivo son reducidas y se satisfacen perfectamente con las obras descritas.

5 HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El acuífero Río Sonora está contenido en un medio poroso y permeable constituido de boleas, gravas, arenas, no consolidados, restringidas a los cauces del río y arroyos tributarios, presentan buena porosidad granular y por tanto son sedimentos regularmente de buena permeabilidad y más aún cuando presentan buena clasificación. Estos sedimentos constituyen actualmente el acuífero de la localidad. Es del tipo libre cuyas fronteras laterales corresponden a rocas ígneas intrusivas del tipo granítico y extrusivas del tipo riolítico y andesítico.

En algunas zonas como en los valles de Ures y San Felipe de Jesús, donde el acuífero presenta sus mayores dimensiones de amplitud, aflora la formación Baucarit que es un complejo conglomerático de mediana a baja permeabilidad. La profundidad del basamento impermeable varía desde unos 15 m en los estrechamientos del cauce a unos 200 m donde esté es más extenso.

5.2 Parámetros hidráulicos

De acuerdo con la información contenida en los estudios, las pruebas de bombeo que se llevaron a cabo consistieron en una etapa de abatimiento y una de recuperación; su duración dependió del comportamiento del nivel del agua y de la disponibilidad de los pozos.

En ninguna de las pruebas realizadas se contó con pozos de observación; las observaciones se limitaron al pozo de bombeo. La utilidad de las pruebas sin pozos de observación es limitada, pues la interpretación del comportamiento del nivel del agua en el pozo de bombeo solo permite estimar, en el mejor de los casos, deducir el coeficiente de transmisividad, y no proporciona información respecto al coeficiente de almacenamiento.

Para su interpretación las observaciones se graficaron en trazado semilogarítmico, Los métodos de interpretación utilizados fueron el de Jacob, Hantush en pozos y el de Papadopolos en norias.

En cada gráfica se anotan las expresiones matemáticas utilizadas según el método elegido. Como información complementaria de mucha utilidad, se calculó el valor del caudal específico o caudal por unidad de abatimiento.

Este parámetro representa en una forma más objetiva la capacidad transmisora del acuífero; un caudal específico alto refleja una alta transmisividad y viceversa. Esto permite utilizarlo como un indicador de ésta, cuando las pruebas no resultan interpretables; o cuando se carece de ellas. Presenta, además, la ventaja de no ser afectado por errores de interpretación, ya que está dado por el coeficiente de dos términos medidos (Caudal y abatimiento).

En algunos casos, el caudal específico permite inferir el valor del coeficiente de transmisividad, mediante expresiones matemáticas deducidas en la teoría de la Hidráulica de Pozos.

Se cree que en la mayoría de las pruebas realizadas, el sistema de flujo real debe de ser más complicado que los analizados por Theis, Jacob y Hantush. La presencia de estratos arcillosos entre el nivel freático y el cedazo del pozo, da lugar a un comportamiento tipo semiconfinado; la cementación de una parte del espesor del acuífero induce efectos de penetración parcial; el movimiento del nivel freático en materiales finos implica un retraso en el drenado vertical, etc.

Pero, para efectos prácticos, los resultados de las pruebas dan una idea aproximada de la distribución de las características hidrodinámicas, advirtiendo que las transmisividades deducidas corresponden a la porción del acuífero captado por el cedazo del pozo, y que el coeficiente de almacenamiento corresponde al área afectada por el bombeo y a tiempos cortos, no reflejando necesariamente el tipo de comportamiento que deben tener los acuíferos a escala regional y para tiempos largos.

En la subcuenca del río Sonora, las transmisividades varían entre 1×10^{-3} y $84 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La interpretación de estas pruebas fue mediante el método de Jacob (j), Hantush (H) y Papadopoulos (P).

5.3 Piezometría

En este acuífero se cuenta con información piezométrica correspondiente a los meses de Octubre de 1970, 1975, 1976 y del período Marzo – Agosto de 1977. Los datos de 1970 fueron obtenidos por la Cía. Ariel Construcciones, S.A., durante el estudio de esta zona que realizaron en ese año; la información de 1975 y 1976 es muy escasa y fue obtenida por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

La Comisión Nacional del Agua ha realizado actividades de piezometría en la parte baja del acuífero, propiamente en el área limítrofe con el acuífero Mesa del Seri-La Victoria. Hacia la parte alta del acuífero, la información de piezometría es aislada y escasa.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Dentro de esta subcuenca, existen dos unidades hidrogeológicas que constituyen acuíferos; uno de ellos, de un gran desarrollo pero de extensión muy reducida, corresponde a los depósitos Cuaternarios aluviales y fluviales o de acarreo del río, y la otra, constituida por materiales conglomeráticos del Terciario.

El acuífero constituido por los conglomerados, se explota únicamente en las áreas más bajas de la subcuenca, una de ellas localizada entre la confluencia del Río Sonora con el San Miguel, área conocida con el nombre de Cadena o la Resolana; y la otra, conocida con el nombre de Mesa del Seri.

En los materiales Cuaternarios aluviales y fluviales del río Sonora desde la población de Arizpe hasta la confluencia con el río San Miguel, los niveles del agua subterránea se encuentran a profundidades que varían entre 1 y 30 metros.

Las profundidades mayores se encuentran en la zona baja de la subcuenca, del Molino de Camou hasta dicha confluencia; el rango de variación es de 15 a 20 metros, aumentando en el sentido del Río Sonora. En la parte alta de la subcuenca, los niveles del agua subterránea se encuentran entre 1 y 15 metros, con una distribución muy irregular.

En términos generales, las profundidades menores se encuentran cercanas al cauce del río, aumentando hacia las márgenes.

En algunos casos se encuentran niveles muy someros, en las cercanías de las márgenes del río, debido a la ocurrencia de arroyos tributarios. También como regla general, la variación de la profundidad del nivel del agua subterránea, a todo lo largo del río Sonora en su porción alta, se ve regulada o conformada por la topografía de los materiales conglomeráticos e impermeables que subyacen a los depósitos aluviales y fluviales, así como a los estrechamientos del río que funcionan como levantadores del nivel del agua, haciéndola aflorar.

En los materiales conglomeráticos del Terciario, los niveles del agua se encuentran a profundidades que varían entre 15 y 60 metros. En el área conocida como Mesa del Serí, la profundidad de dichos niveles es de 15 a 30 metros, y en el área de la Cadena y La Resolana, varía entre 30 y 60. Las curvas de igual profundidad al nivel estático en estas dos áreas, reflejan los efectos del bombeo; y de la comparación de éstas profundidades con las que existían en 1970, en términos generales entre 10 y 50 metros resulta evidente la influencia de la explotación: En estas áreas, los niveles han descendido desde 1970 a la fecha entre 5 y 12 metros.

5.4.2 Elevación del nivel estático

Con apoyo de los datos de niveles del agua subterránea referidos al nivel del mar, se trazaron curvas de igual elevación del nivel estático. Las configuraciones así obtenidas permiten inferir las direcciones del flujo subterráneo: en el subsuelo el agua sigue trayectorias normales a dichas curvas y en el sentido en que decrece la carga hidráulica.

El flujo subterráneo sigue sensiblemente las mismas direcciones que el escurrimiento superficial. Las elevaciones del nivel estático varían entre 685 msnm en la cabecera del valle, a la altura del poblado de Sinoquipe, y unos 215 msnm en la confluencia de los ríos Sonora y San Miguel, en las proximidades de la Presa Abelardo L. Rodríguez. De Sinoquipe a Mazocahui las elevaciones del nivel estático varían entre 685 y 480 msnm con un gradiente medio de flujo de 3.5 al millar.

En el esquema de flujo subterráneo definido, no se observa ninguna deformación de las curvas que sugiera alguna sobreexplotación del acuífero. En términos generales, las curvas equipotenciales o de igual elevación del nivel estático son normales al cauce del río y a los contactos con los conglomerados en las márgenes, aunque existen algunos tramos donde estas curvas tienen cierta concavidad, que sugiere que el río Sonora se comporta como un efluente.

La extensión superficial del acuífero es muy reducida; Los depósitos aluviales del río tienen un desarrollo de unos 60 kilómetros y una amplitud de apenas 1.5 kilómetros en promedio, esta amplitud, en las proximidades de Mazocahui, se ve totalmente reducida en el estrechamiento formado por el cerro el Cahui, donde el agua subterránea aflora a una elevación de unos 550 msnm.

Desde Mazocahui hasta Puerta del Sol, el río Sonora, se encuentra muy encañonado. En este tramo existen unas 5 norias destinadas a usos domésticos, cuyo nivel del agua no fue referenciado al nivel del mar, por no considerarse necesario para los fines del estudio.

A partir del poblado de Puerta del Sol, los depósitos aluviales del río Sonora vuelven a ampliarse, formando lo que se conoce como valle de Ures. Este valle con una longitud de unos 22 kilómetros y una amplitud de unos 2.5 kilómetros en promedio, puede considerarse como el más importante de la subcuenca, ya que ahí se encuentran las obras de captación con los más altos rendimientos.

En el valle de Ures, el flujo subterráneo sigue sensiblemente la misma dirección que el río Sonora. Las elevaciones del nivel estático varían desde unos 400 msnm en las inmediaciones de Puerta del Sol hasta 350 metros sobre el mismo nivel, a la salida del valle, en las proximidades del poblado de Guadalupe. El gradiente medio de flujo es de 2.5 al millar. Puede apreciarse en la configuración de los niveles estáticos, las aportaciones subterráneas que recibe el acuífero por las márgenes, procedentes de los arroyos de Bicoca y Ures por la margen izquierda y Sunibiate por la margen derecha.

En general, la explotación no ha modificado notablemente el esquema natural del flujo subterráneo. Actualmente existen descargas subterráneas del acuífero que afloran en la salida del valle al encañonarse el río y desaparecer el relleno, a unos 3 kilómetros aguas abajo del poblado de San Rafael, constituyendo parte de las aportaciones que recibe el acuífero del Valle de Topahue, localizado a unos 12 kilómetros aguas abajo del valle de Ures. El valle de Topahue, con una longitud de unos 13 kilómetros y un ancho promedio de unos 2 kilómetros, es el último de los valles formados por el río Sonora en su parte más alta.

El flujo subterráneo de este valle, también sigue sensiblemente la misma dirección que el escurrimiento superficial; las elevaciones del nivel estático varían entre 305 msnm en la entrada del valle y 270 metros en la salida del mismo, en las proximidades de la estación hidrométrica el Orégano. El gradiente medio del flujo es de 2.7 al millar. Al igual que en todos los valles anteriores formados por el río Sonora en su parte más alta, la explotación del acuífero no ha modificado notablemente el esquema natural de flujo subterráneo.

Por otra parte el área conocida con el nombre de La Cadena o La Resolana, la explotación ha provocado también la formación de conos de abatimiento, hacia los cuales, converge el flujo subterráneo que circula a través de los materiales Terciarios, desde las partes altas de la cuenca.

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para determinar la evolución de la profundidad de los niveles del agua subterránea, se construyeron los hidrógrafos de 52 pozos, de los más representativos del comportamiento de los niveles del agua subterránea en el área del acuífero desde 1970 a 1977.

Las observaciones ilustradas corresponden a Octubre de 1970, fueron realizadas por la Compañía Ariel Construcciones, S.A. en un estudio de ese año; a Octubre de 1975 y Octubre de 1976, efectuadas por la Secretaría de Recursos Hidráulicos; y por último, a las observaciones llevadas a cabo por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería, TMI en 1977.

En términos generales, en estos hidrógrafos puede apreciarse que los niveles del agua en el intervalo Octubre 1970- Mayo 1977, descendieron, y de Mayo a Octubre de 1977, se recuperaron. En el primer período, los hidrógrafos no muestran el comportamiento estacional de los niveles del agua, pero si reflejan los efectos de una sobreexplotación. En casi todos ellos para dicho intervalo, es evidente el descenso del nivel.

En el segundo intervalo, correspondiente a Mayo - Septiembre de 1977, en todos los hidrógrafos puede apreciarse el efecto de una gran recarga a los acuíferos del área, ocurrida en la temporada de lluvias de este año, la cual fue anormalmente alta.

La mayoría de los pozos alcanzaron una recuperación del nivel del agua equivalente en unas dos terceras partes a los abatimientos observados en el intervalo anterior. Algunos de los pozos, estuvieron a punto de alcanzar el nivel de 1970.

Para ilustrar la evolución de los niveles de agua en el área y calcular los cambios de almacenamiento en los acuíferos; se trazaron curvas de igual evolución del nivel estático para diferentes intervalos de tiempo según la información disponible, según se describe a continuación.

Valle San Francisco de Batuc-Topahue

Para este valle se contó únicamente con los datos de niveles del agua subterránea obtenidos por TMI, en el período Abril - Septiembre de 1977. Del comportamiento de los mismos en dicho período, se seleccionó para configuración de evolución del nivel estático el intervalo Mayo- Septiembre, el cual correspondió al período de recarga del acuífero. En esta configuración se puede observar que en toda la superficie del valle los niveles del agua se recuperaron. Estas recuperaciones varían entre 0.5 y 3 metros, siendo la recuperación media en dicho intervalo de 1.2 metros.

Valle de Ures

Igual que en el valle anterior, se contó con la misma información respecto a los niveles del agua y seleccionó el mismo intervalo Mayo - Septiembre para conocer la evolución de los mismos y calcular el cambio de almacenamiento del acuífero. La evolución de los niveles estáticos Mayo - Septiembre de 1977, refleja claramente los efectos de la recarga del acuífero ocurrido en ese intervalo. Los niveles se recuperaron entre 1 y 7 metros, los mayores en la cabecera del valle y los menores en la salida del mismo. La recuperación media en dicho intervalo fue de 2.4 metros. Si comparamos con el valle anterior San Francisco de Batuc - Topahue, localizado a unos 12 Km. aguas abajo de Ures, se observa que para el mismo intervalo, la recuperación media del nivel en el valle de Ures fue dos veces mayor. Este hecho refleja cualitativamente una gran capacidad de recarga en el valle de Ures.

Valle de Mazocahui – Sinoquipe

Este valle corresponde al último tramo del río Sonora donde se llevan a cabo aprovechamientos de agua subterránea relativamente importantes; la superficie acuífera es de unos 76 Km² y la explotación asciende a unos 11 millones de m³/año.

La evolución del nivel estático en el intervalo Octubre 1970-Mayo 1977, muestra los efectos de un bombeo intenso entre Banámichi y Huepac; los abatimientos provocados en esta área fueron entre 5 y 8 metros; en el resto del valle, los abatimientos fueron menores, entre 1 y 5 metros.

El abatimiento medio en ese intervalo para toda la superficie analizada, fue de unos 3 metros; o sea, un abatimiento medio anual de unos 50 cm.

La evolución del nivel estático en el intervalo Mayo - Octubre de 1977, puede apreciarse los efectos de la recarga ocurrida en este intervalo.

En términos generales los niveles del agua se recuperaron entre 0.5 y 5 metros, las mayores se presentan en la cabecera del valle y las menores en la salida del mismo. La recuperación media en toda la superficie analizada fue de unos 2.5 metros.

Cabe hacer notar que las recuperaciones del nivel estático alcanzadas en este año en todos los valles del río Sonora se debieron por una parte a las altas precipitaciones ocurridas que generaron una recarga que puede considerarse como extraordinaria, y por otra parte, especialmente en los valles altos se debe a las reducidas dimensiones del acuífero, que como se ha mencionado anteriormente, su extensión se limita a los depósitos fluviales y aluviales del río. Esto último, es muy común en acuíferos de este tipo: la acción de la recarga que refleja espectacularmente en la recuperación de los niveles del agua.

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Las configuraciones de sólidos totales disueltos en ppm de la subcuenca del Río Sonora.

En la parte correspondiente a la zona más alta de la subcuenca, se puede observar que el total de sólidos en solución en el agua subterránea, varían entre 350 y 660 ppm, encontrándose las más bajas en la cabecera de la subcuenca (proximidades de Banámichi) e incrementándose gradualmente en el sentido del río, hasta el Cahui, donde se tienen las mayores concentraciones de STD.

Esta variación confirma la dirección del flujo subterráneo, deducida de las curvas de igual elevación del nivel estático.

El rango de valores en que se encuentra la concentración de STD, en el agua subterránea de esta porción de la subcuenca, permite inferir que los materiales que constituyen el acuífero deben ser de alta permeabilidad y que el agua es de relativa reciente infiltración.

En la porción intermedia de la subcuenca, donde se localizan los valles de Ures y Topahue la concentración de STD, varía de 400 a 700 ppm. Como regla general la concentración aumenta desde la cabecera de los valles hasta la salida de los mismos, con excepción de las áreas donde confluyen arroyos de cierta importancia, de donde proceden aportaciones subterráneas al acuífero propiciando una disminución en la concentración de STD, siendo ésta, en los dos valles de unos 400 ppm.

Al igual que en la parte alta de la subcuenca el rango de variación de STD, es indicativo de una alta permeabilidad del acuífero y puede inferirse también que le agua es de relativa reciente infiltración.

Aún cuando la configuración de STD en esta parte baja de la subcuenca no presenta como en los otros valles una variación gradual, sino por el contrario, se observan en algunas zonas situaciones aparentemente ilógicas como en el caso de las curvas de valores 800 y 900 ppm que aparecen junto a otras de valores entre 250 y 500 ppm.

Se deben principalmente a las diferentes profundidades de las captaciones muestreadas, ya que en esta zona se explotan indistinta y conjuntamente el acuífero aluvial y los conglomerados.

SULFATOS (SO_4)

Río Sonora.- La distribución del anión sulfato es semejante a la de STD, las menores concentraciones se localizan en la parte alta de la cuenca, entre Sinoquipe y Banamichi, en concentraciones de 50 a 90 ppm. Conforme el agua circula por el río va incrementando su contenido de sulfatos hasta del orden de 200 a 250 ppm en la porción baja del río; únicamente se observaron altas concentraciones de sulfatos en las cercanías de Baviácora.

BICARBONATO (HCO_3)

Río Sonora.- Las concentraciones de bicarbonato varían de menos de 250 a 500 ppm, las menores concentraciones se localizan en la cabecera de la cuenca, y las mayores de Baviácora a Mazocahui., lo cual indica que la zona de mayor precipitación pluvial se encuentra entre las poblaciones antes mencionadas.

CALCIO (Ca)

Río Sonora.- Los contenidos de Calcio varían de 60 a 250 ppm, las concentraciones menores se localizan en la parte alta de la cuenca y las mayores cerca de Baviácora.

SODIO (Na)

Río Sonora.- La distribución del ion Sodio en esta cuenca es de 50 a 70 ppm; únicamente una noria en Huepac presenta contenidos del orden de 150 ppm. En general, la distribución de este elemento es muy homogénea en la cuenca.

Diagramas triangulares

Los diagramas triangulares son un tipo de representaciones de los resultados sus análisis químicos practicados al agua. Estos diagramas proporcionan medios útiles para poder contrastar las diferentes o similitudes entre varias aguas. En el caso que nos ocupa, el número elevado de muestras obtenidas da lugar a un volumen de datos de difícil manejo; por lo que después de un minucioso análisis de las determinaciones químicas efectuadas a las muestras de agua, se seleccionaron las más representativas con el objeto de facilitar su manejo e interpretación.

Mediante los diagramas triangulares pueden observarse los efectos de mezcla entre dos aguas, ya que la representación de una mezcla entre dos aguas, ya que la representación de una mezcla caerá dentro del intervalo de recta que una a las dos aguas primitivas.

Interpretación de los diagramas

Los puntos representados en el triángulo de los cationes, quedan ubicados en su mayoría en el vértice de la zona de aguas cálcicas; los puntos representados en el triángulo de los aniones se ubican en su totalidad en el vértice de la zona de aguas bicarbonatadas.

En el rombo, todos los puntos caen dentro del intervalo de rectas que une a las dos aguas primitivas, deduciéndose que el agua subterránea de estos valles es del tipo cálcico-bicarbonatada.

En términos generales el agua del subsuelo obtiene estos dos iones principalmente de las rocas sedimentarias de origen marino, a partir de la disolución de las rocas bicarbonatadas. Sin embargo, en estos valles no existen rocas de este tipo: las rocas que ahí afloran son sedimentarias continentales, ígneas y metamórficas.

En las rocas ígneas y metamórficas la descomposición meteórica libera calcio de minerales del grupo de los feldespatos.

En los valles altos de los ríos Sonora y San Miguel, el contenido de calcio en el agua subterránea se debe principalmente a la disolución de los feldespatos de las rocas graníticas, y el bicarbonato debe su existencia al dióxido de carbono procedente de la atmósfera y del suelo principalmente.

La concentración de dióxido de carbono en el aire que existe en el interior de los suelos puede ser de 10 a 100 veces mayor que la concentración en el aire de la atmósfera; este aumento en el contenido de dióxido de carbono en el aire del suelo hace que el agua de éste pueda contener fácilmente 100 ppm. De calcio o más. En los valles altos de los ríos Sonora y San Miguel el contenido de calcio en el agua subterránea es de unas 75 ppm. En promedio.

Por otra parte las aguas subterráneas generalmente contienen más de 10 ppm. De bicarbonato, pero menos de 800 ppm. Las concentraciones más frecuentes suelen estar comprendidas entre 50 y 100 ppm. En los valles altos de los ríos Sonora y San Miguel el contenido de bicarbonatos es de 285 ppm, en promedio.

Por último, cabe señalar que tanto el agua subterránea del acuífero Río Sonora y del acuífero Río San Miguel según lo indican sus diagramas triangulares, todas las muestras se agrupan en las inmediaciones de la posición media del agua subterránea potable.

6 CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Dentro de este acuífero, se censaron 638 obras de captación de agua subterránea, de las cuales 447 son norias, 182 pozos profundos, 7 tajos y 2 manantiales, estos últimos son características termales (60° C).

Del total de captaciones, 469 están activas y 169 sin equipo e inactivas. Las captaciones activas son operadas para los siguientes usos: 317 para uso agrícola (se incluyen 7 tajos); 57 para abastecimiento de agua potable; 9 para uso industrial; 84 para usos domésticos y de abrevadero, y los 3 manantiales para usos terapéuticos.

Todos los aprovechamientos de agua subterráneas se encuentran localizados en el valle del Río Sonora propiamente dicho, desde la población de Arizpe hasta su confluencia con el Río San Miguel.

Incluyendo las obras perforadas en el área conocida como Mesa del Seri y los pozos para abastecimiento de agua potable en Hermosillo, Son., (25 pozos) ubicadas inmediatamente aguas debajo de la Presa Abelardo L. Rodríguez tanto las norias como los pozos profundos tienen sus características particulares en lo referente a su construcción según se detalla en el catálogo de aprovechamientos.

En términos generales, las norias son de gran diámetro, unos dos metros, y tienen profundidades que varían entre los siguientes rangos: de 3 a 20 metros en la zona alta, entre Ures y Arizpe, y de 10 a 25 metros en la zona baja entre Topahue y la Presa Abelardo L. Rodríguez.

Los caudales de extracción de estas norias varían en los siguientes rangos: de 5 a 100 lps, siendo en la gran mayoría de los casos superiores a 40 lps, existiendo algunos cuyos caudales son superiores a los 100 lps, especialmente en el valle de Ures.

Por lo que respecta a pozos profundos, éstos, se encuentran perforados a profundidades que varían entre 25 y 130 metros, existiendo solamente un pozo de estudio localizado cerca de la confluencia de los ríos Sonora y San Miguel, que alcanzó una profundidad de 412 metros (Pozo 973).

Los caudales de extracción de los pozos son superiores a los 40 lps en la mayoría de los casos existiendo algunos cuyo caudal es hasta de 100 lps.

Dentro de esta misma subcuenca en el valle del Río Santa Rosalía – La Junta, afluente del río Sonora por su margen izquierda a la altura de San Francisco de Batuc, y situado aproximadamente a 50 kilómetros al oeste de la Ciudad de Hermosillo, entre las poblaciones de Santa Rosalía y Pueblo de Alamos, se sabe de la existencia de unas 100 norias, de las cuales, únicamente 34 se encuentran equipadas y en operación.

Estas 34 obras de captación de aguas subterráneas se censaron y localizaron debidamente, el resto de las obras, destinadas para usos domésticos y de abrevadero, se operan manualmente, obteniéndose caudales muy poco significativos del volumen total de extracción.

Las norias equipadas, de gran diámetro la mayoría, tienen profundidades entre 7 y 27 metros. Los caudales de extracción son superiores a los 20 lps en la gran mayoría de los casos, existiendo algunos cuyo caudal es superior a 30 lps.

Estas norias son operadas para los siguientes usos: 29 para uso agrícola, todos localizados en ejidos; 4 para abastecimiento de agua potable y 1 a uso doméstico. La capacidad total instalada en los equipos de bombeo de estas 34 obras, asciende a 690 lps.

De acuerdo con información proporcionada por la Subgerencia de Administración del Agua, a la fecha se tiene la siguiente distribución:

Aprovechamientos inscritos en el REPDA

Usos	No. aprov.	Volumen (m ³)
Agrícola	308	49'650,722.00
Agroindustrial	-	-
Doméstico	40	17,189.25
Industrial	2	461,200.00
Múltiples	127	3'978,460.50
Pecuario	428	823,105.25
Público Urbano	159	2'153,754.68
Servicios	-	-
Total	1,064	57'084,431.68

Volumen de extracción considerado en el balance

No. aprov.	Volumen (m ³)
638	74'600,000.00

7 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

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

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

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

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

7.1 Entradas y Salidas

Valle San Francisco de Batuc-Topahue

En este valle se plateó el balance de aguas subterráneas para un área de unos 26 km², sus límites aproximados y los resultados del balance se desglosan como sigue: La ecuación de balance aplicada al acuífero de esta área es la siguiente:

$$Eh + R - Sh - B = \pm \otimes V'S$$

Para esta área en lo referente a datos de niveles del agua, se contó únicamente con los obtenidos mensualmente durante el período Abril – Septiembre de 1977.

Del comportamiento de los niveles en ese período, se seleccionó el correspondiente al intervalo Mayo – Septiembre, el cual, se observaron recuperaciones del nivel estático en casi todas las obras de captación, reflejándose en esto, el efecto de la alimentación que recibió el acuífero, como consecuencia de la temperatura de lluvias.

Con esta información, solo es posible plantear una ecuación de balance correspondiente a la fracción de año Mayo – Septiembre de 1977, en la que se considera que ocurrió la recarga principal.

Es muy probable que la recarga del acuífero tenga lugar a lo largo de todo el año por la infiltración de una cierta proporción de los volúmenes aplicados en el riego.

Sin embargo, la fuente principal de alimentación del acuífero, la constituye la infiltración de la lluvia en el área de balance y la infiltración de los escurrimientos a lo largo del cauce del Río Sonora.

De la ecuación de balance aplicada al acuífero de este valle, fue posible conocer en forma directa para el intervalo mencionado, los términos Eh, Sh, B y $\otimes V'$, teniéndose como incógnitas a los términos R y S.

Como se carece de información para plantear otra ecuación de balance para deducir los valores de R y S.

Se optó por inferir un rango de valores que puede tomar el coeficiente de almacenamiento regional, acorde con la litología de los materiales que constituyen el acuífero.

En esta forma se tiene como única incógnita a la recarga R.

Esta evaluación así efectuada, solo proporcionará una idea preliminar de la recarga al acuífero y de las condiciones de explotación en que se encuentra el mismo.

Términos de la ecuación de balance de aguas subterráneas
Tramo Topahue – San Francisco de Batuc

VOLUMEN DE ENTRADA Y SALIDA POR FLUJO SUBTERRANEO					BOMBEO ANUAL B EN Mm ³	CAMBIO DE ALMACENAMIENTO		
FECHA	CAUDAL ES EN 10 ⁻³ m ³ /s		TIEMPO EN 10 ⁶ s	VOLUMENES EN 10 ⁶ m ³		⊗ V =	⊗ V'S	
	Eh	Sh		Eh		Sh	⊗V'en 10 ⁶ m ³	⊗h en m
Mayo 1977	29.0	22.5						
Ecuación 1	31.8	20.8	10.6	0.34	0.22	2.742	+31.215	+ 1.19
Septiembre 1977	34.6	19.2						

Para el cálculo de los términos Eh, Sh y ⊗V' se siguió el mismo procedimiento que en el caso anterior, indicado en el inciso a 1.1.

En las configuraciones del nivel estático de esta área, se señalan las secciones utilizadas para el cálculo de los caudales de entrada y salida por flujo subterráneo, anotándose ahí mismo los valores medios de T, L e i y el caudal resultante.

$$\text{ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE} = Eh + R - Sh - D - B = \pm \otimes V$$

Área de Balance = 26.0 km²

Eh = Recarga por flujo subterráneo.

D = Descargas aflorando en forma de manantiales o corrientes superficiales.

R = Recarga en el área de balance

B = Descarga por pozos de bombeo

Sh = Descarga por flujo subterráneo

⊗V = Cambio en almacenamiento

La evolución del nivel estático en el intervalo Mayo – septiembre de 1977, se calculó el término ⊗V' que en este caso resultó como un incremento en el volumen de acuífero saturado, el cual multiplicado por el coeficiente de almacenamiento respectivo, proporciona el cambio de almacenamiento.

El volumen de bombeo, se estimó por medio del producto de los caudales y tiempos de bombeo de las obras de explotación. En el intervalo Mayo - Septiembre de 1977, la extracción de agua subterránea mediante dichas obras fue de 2.7 millones de m³/año. Al igual que en todos los valles, fue posible estimar el volumen anual de extracciones, mediante interrogatorios a los usuarios a cerca de la operación de sus obras.

El volumen de extracción de agua subterránea en el valle de San Francisco de Batuc – Topahue, se estimó en unos 10 millones de m³/año.

En la tabla anterior se presentaron los valores de cada uno de los términos de la ecuación de balance, expresados en millones de m³. Aplicando los valores correspondientes de Eh, Sh y B y $\Delta V'$ indicados en la tabla anterior, se planteó la siguiente ecuación de balance. Mayo – Septiembre de 1977 $0.34 + -0.22 - 2.74 = 31.25 S$
La cual puede expresarse también en la forma siguiente: $R = 31.25 S + 2.62$

Para deducir el volumen de recarga al acuífero en el intervalo Mayo – septiembre de 1977, basta con aplicar en la ecuación el valor del coeficiente de almacenamiento regional S, el cual fue inferido a partir del conocimiento de los materiales que constituyen el acuífero.

El acuífero del valle San Francisco de Batuc – Topahue es del tipo “Libre” y está constituido por los depósitos Cuaternarios aluviales y fluviales del Río Sonora, desafortunadamente no se contó con ningún corte litológico de las obras de captación para tener una idea bastante aproximada de la litología de estos depósitos.

Sin embargo, por medio de los reconocimientos geológicos de campo y las observaciones directas de las obras de captación, que en su mayoría son perforaciones de gran diámetro y a cielo abierto, se observó que el acuífero está constituido principalmente por arenas y arcillas que empacan a gravas con algunos guijarros.

De lo anterior, puede inferirse que el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero varía en un rango de valores entre 0.10 y 0.20 aplicando en la ecuación anterior, cifras de S diámetro del rango mencionado, se obtienen los siguientes valores de recarga:

$$R = 31.25 S + 2.62$$

S = Recarga Vertical

5.7 millones de m^3

7.3 millones de m^3

8.9 millones de m^3

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se concluye que la recarga vertical al acuífero del valle San Francisco de Batuc- Topahue, en el intervalo Mayo – Septiembre de 1977, fue entre unos 6 y 9 millones de m^3 . Es importante señalar que esta evaluación fue realizada en un intervalo con precipitación anormalmente alta. Por tanto, es lógico suponer que en años con precipitación media o menor el acuífero recibe una alimentación inferior a la que recibió en 1977, aunque resulta aventurado estimar en qué medida es menor la recarga.

De cualquier manera, puede concluirse que en la actualidad ya se está utilizando la totalidad del recurso renovable del acuífero por las siguientes razones:

Considerándose la condición más favorable, es decir, una recarga generada por las lluvias de unos 9 millones de m^3 , y una alimentación adicional de un millón de $m^3/año$, por la infiltración de los volúmenes aplicados en el riego (10% del bombeo), y extrapolando los valores E_h y S_h e un año, se tendría el siguiente balance anual de aguas subterráneas:

$E_h = 1.1$ millones de $m^3/año$	$B = 10$ millones de $m^3/año$
$R = 10.0$ millones de $m^3/año$	$S_h = 0.7$ millones de $m^3/año$
$R_t = 11.1$ millones de $m^3/año$	$D_t = 10.7$ millones de $m^3/año$

Este balance anual efectuado, bajo las condiciones más favorables de recarga, indica un equilibrio entre la recarga y descarga del acuífero.

Por lo tanto, puede concluirse que, en años de bajas precipitaciones, la recarga del acuífero será considerablemente menor que la apuntada anteriormente, y cualquier incremento de la explotación será a costa del almacenamiento subterráneo. A la fecha, la explotación no ha modificado notablemente el esquema natural de flujo subterráneo; todavía existen descargas de flujo subterráneo a la salida del valle (2 lps), las cuales afloran aguas abajo al desaparecer el relleno en el estrechamiento conocido como El Orégano.

Es muy probable que, en condiciones naturales, o sea, antes de la explotación, estas descargas fueran un poco mayores.

Actualmente al final de la época de secas el afloramiento de agua en este estrechamiento ya es inapreciable. Al incrementarse la explotación estas descargas se verían totalmente interceptadas.

Valle de Ures

La evaluación de la recarga al acuífero de este valle se efectuó de la misma manera que la del valle anterior, pues el comportamiento de los acuíferos es muy similar a la información disponible para plantear la ecuación de balance, corresponde al mismo intervalo de tiempo.

La única variante es el rango de valores de S utilizado: en este caso, por tratarse de un acuífero constituido por materiales que ofrecen menores condiciones de permeabilidad y porosidad que los del valle anterior, se infirió que el coeficiente de almacenamiento regional, varía en un rango de valores entre 0.15 y 0.25.

El área utilizada para plantear el balance es de unos 62 km², sus límites aproximados y los resultados derivados del balance, se indican mediante la ecuación de balance aplicada que es la siguiente:

$$Eh + R - Sh - B = \otimes V'S$$

Es importante señalar que el acuífero de este valle a la salida del mismo, cuando desaparece el relleno presenta descargas de agua subterránea (D) que afloran al Río Sonora en el estrechamiento conocido como San Rafael.

Este término no se incluye en la ecuación de balance, porque al desconocerse el régimen y la cuantía de estas descargas en el intervalo considerado, se optó por fijar el límite del área de balance en la sección de salida por flujo subterráneo. De esta forma, el término Sh, contempla dichas descargas.

De la información obtenida acerca de los afloramientos de agua subterránea en el estrechamiento de San Rafael se sabe que estos tienen un régimen más o menos permanente.

En el mes de Junio (época de secas) se efectuó un aforo de la corriente superficial originada por esta descarga, el caudal de esta corriente fue de nos 200 lps, el cual es muy probable que en la época de lluvias se incremente a unos 300 lps; que corresponde al caudal de flujo subterráneo que circula en la sección de salida del área de balance, calculado a partir de las configuraciones del nivel estático del mes de Septiembre de 1977 y de la transmisividad del acuífero en la mencionada sección.

Antes de deducir de la ecuación de balance el volumen de recarga al acuífero, es importante destacar en el comportamiento del mismo, la presencia de descargas de agua subterránea al Río Sonora en la salida del valle.

Este hecho, apoyado den las configuraciones del nivel estático indica que la explotación no ha modificado notablemente el esquema natural de flujo subterráneo, y por lo tanto, hay base para suponer que el comportamiento del acuífero, existe la condición de flujo establecido, es decir, que la recarga total y las descargas del acuífero se encuentran balanceadas.

De acuerdo con la consideración anterior, para tener una idea aproximada de la recarga anual al acuífero, bastaría con evaluar las descargas correspondientes. Sin embargo, apoyándose en la condición de flujo establecido al aplicar la ecuación de balance para diferentes valores de S del rango mencionado, se podría elegir el valor de esta característica de acuífero que mejor se ajuste a dicha condición.

Términos de la ecuación de balance de aguas subterráneas
Valle de Ures

VOLUMEN DE ENTRADA Y SALIDA POR FLUJO SUBTERRANEO						BOMBEO ANUAL B EN 10 ⁶ m ³	CAMBIO DE ALMACENAMIENTO ⊗V = ⊗V'S	
FECHA	CAUDALES EN 10 ⁻³ m ³ /s		TIEMP O EN 10 ⁶ s	VOLUMENES EN 10 ⁶ m ³			⊗V' EN 10 ⁶ m ³	⊗h EN METROS
	Eh	Sh		Eh	Sh			
Mayo 1977	258.6	268.7						
Ecuación 1			10.6	2.8	3.0	8.191	+150.031	+ 2.40
Septiembre 1977	276.4	303.0						

ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE = Eh + R - Sh - D - B = ± ⊗V

Área de Balance = 62.0 km²

Eh = Recarga por flujo subterráneo

D = Descargas aflorando en forma de manantiales o corrientes superficiales.

R = Recarga en el área de balance

B = Descarga por pozos de bombeo

Sh = Descarga por flujo subterráneo

⊗VS = Cambio en almacenamiento

Cálculo De la Recarga Vertical (R)

En la tabla anterior, se presentan los valores de cada uno de los términos de la ecuación de balance, expresados en millones de m³, aplicando los valores correspondientes Eh, Sh, B y ⊗V'S indicados en ésta tabla, se planteó para el intervalo Mayo – Septiembre la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \mathbf{Eh + R - Sh - B} &= \mathbf{\otimes VS} \\ \mathbf{2.8 + R - 3.0 - 8.2} &= \mathbf{150 S \text{ ó}} \\ \mathbf{R} &= \mathbf{150 S + 8.4} \end{aligned}$$

Ahora bien, dado que el acuífero es del tipo “libre” y está constituido por guijarros y gravas empacadas en arena y arcilla, se infiere que el coeficiente de almacenamiento regional S, varía en el rango de valores entre 0.15 y 0.25. Aplicando diferentes cifras dentro de éste rango, en la ecuación anterior, se obtienen los siguientes volúmenes de recarga vertical:

Recarga Vertical (R)	Coficiente de Almacenamiento. (S)
31 millones de m ³	0.15
38 millones de m ³	0.20
46 millones de m ³	0.25

Si se considera que la recarga vertical tiene un lugar principalmente en la temporada de lluvias, podría conocerse la recarga total para el último ciclo anual, a partir de los volúmenes de recarga deducidos, y extrapolando a un año los volúmenes de entrada por flujo subterráneo (Eh)

$$\text{Recarga total} = \mathbf{R + Eh}$$

S	R	Eh	Rt
0.15	$31 \times 10^6 \text{m}^3$	$8.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$	$39.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$
0.20	$38 \times 10^6 \text{m}^3$	$8.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$	$46.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$
0.25	$46 \times 10^6 \text{m}^3$	$8.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$	$54.4 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$

Para discutir estos resultados, es conveniente hablar de las descargas totales del acuífero. De acuerdo con la información obtenida, se estimó el orden de magnitud de las mismas: el bombeo corresponde a unos 27.5 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, y las descargas por flujo subterráneo de unos 8 millones de $\text{m}^3/\text{año}$, considerándose que se descarga un caudal medio de unos 250 lps. De esta forma las descargas totales del acuífero ascienden a unos 35.5 millones de m^3 .

Por otra parte, los volúmenes de recarga deducidos de la ecuación, corresponden a la infiltración generada por las altas precipitaciones de este año, generalmente las lluvias de la zona no son tan abundantes. Por lo tanto, es lógico suponer que en años con precipitación media o menor el acuífero recibe aportaciones inferiores a las calculadas.

Partiendo de la base que existe el acuífero la condición de flujo establecido y comparando la descarga total anual con las recargas totales obtenidas con valores de S igual a 0.15, 0.20 y 0.25, puede observarse que el correspondiente a 0.15 ($R = 39 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$) es del mismo orden de magnitud de las descargas anuales ($D = 35 \times 10^6 \text{m}^3/\text{año}$).

La recarga del acuífero en años de precipitación media, de acuerdo con el comportamiento del acuífero debe ser del mismo orden de magnitud de las descargas. Por tanto, la solución de la ecuación de balance planteada para el intervalo Mayo – Septiembre de 1977, con un coeficiente de almacenamiento igual a 0.15, sugiere que este coeficiente de almacenamiento igual a 0.15, sugiere que este coeficiente es mayor, sólo así la recarga deducida de la ecuación sería también mayor.

En otros valles de la subcuenca del río Sonora, contemplados en el presente estudio, fue posible conocer en qué proporción la recarga a los acuíferos en este año, fue mayor que la de los años de precipitación media o menor.

En términos generales, esta proporción resultó ser de 1.5 veces mayor.

La recarga media es de 35 millones de m^3 , sin embargo se estima que este año el acuífero recibió una recarga de 50 millones de $m^3/año$.

Los resultados obtenidos del balance de agua subterránea en el valle de Ures, pueden resumirse en la forma siguiente: en el área de balance el acuífero tiene un coeficiente de almacenamiento medio regional igual a 0.18.

La recarga total del acuífero en años con precipitación pluvial cercana a la media es de unos 35 millones de $m^3/año$; y de unos 50 millones de m^3 en años de precipitación abundante.

Las descargas anuales del acuífero son de unos 35 millones de $m^3/año$, de las cuales unos 28 millones corresponden al volumen anual extraído actualmente por las obras de captación y el resto 7 millones de $m^3/año$, corresponden al volumen que descarga al acuífero en el estrechamiento de San Rafael.

En años lluviosos la descarga natural del acuífero asciende a unos 22 millones de $m^3/año$ y tiene lugar en el estrechamiento mencionado y a lo largo del río. De cualquier manera la recarga y descarga totales del acuífero se encuentra balanceadas.

La disponibilidad del recurso hidráulico subterráneo en este valle, está representada por las descargas naturales del acuífero.

Esta es variable y depende de la cuantía de la precipitación; en años de lluvia media, es de unos 7 millones de $m^3/año$ y en años lluviosos, de 22 millones de $m^3/año$.

Valle de Mazocahui-Banámichi

En este valle se planteó el balance de aguas subterráneas por un área total de unos 76 km^2 , sus límites aproximados y los resultados del balance se indican a continuación.

De acuerdo con la información disponible, la ecuación de balance se aplicó en dos porciones de acuífero; una de unos 46 km^2 comprendida entre los poblados de Aconchi y Banámichi, y otra de 30 km^2 correspondiente al tramo Mazocahui Aconchi.

La ecuación general de balance de agua subterránea, aplicada en los dos casos es la siguiente:

$$Eh + R - Sh - D - B = \Delta V'S$$

En la que Eh y Sh, son los volúmenes de entrada y salida por flujo subterráneo, respectivamente; R, la recarga vertical en el área de balance D, descargas del acuífero aflorando a lo largo del río; B, la extracción mediante las obras de captación y $\Delta V'S$ el cambio de almacenamiento.

Para el cálculo de los términos de la ecuación se siguió el mismo procedimiento que en los valles anteriores.

Las descargas del acuífero que afloran a lo largo del río se aforaron en el mes de Junio de 1977 a la salida del valle de Mazocahui.

En la tabla siguiente, se presentan los valores de cada uno de los términos de la ecuación de balance en millones de m³, correspondientes a cada intervalo de tiempo considerado.

Tramo Aconchi – Banámichi

En este tramo del río Sonora, se contó con información suficiente para plantear el balance en los siguientes intervalos de tiempo: Octubre 1970 Mayo 1977 y Mayo – Octubre de 1977, las ecuaciones correspondientes son las siguientes:

Términos de la ecuación de balance de aguas subterráneas
Tramo Banamichi - Mazocahui

VOLUMEN DE ENTRADA Y SALIDA POR FLUJO SUBTERRANEO					BOMBEO ANUAL B EN 10 ⁶ m ³	CAMBIO DE ALMACENAMIENTO $\Delta V = \Delta V'S$		
FECHA	CAUDALES EN 10 ⁻³ m ³ /s		TIEMPO EN 10 ⁶ s	VOLUMENES EN 10 ⁶ m ³		$\Delta V'$ En 10 ⁶ m ³	Δh EN METROS	
	Eh	Sh		Eh				Sh
Octubre 1970	91.0	45.0						
Ecuación 1	85.5	45.0	208.1	17.7	9.4	71.0	- 154.0	- 3.29
Mayo 1977	80.0	45.0						
Ecuación 2	84.0	45.0	13.2	1.1	0.6	3.6	+ 145.0	+ 1.95
Octubre 1977	88.0	45.0						

ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE = $E_h + R - S_h - D - B = \pm \Delta V$

Área de Balance = 76.0 km²

E_h = Recarga por flujo subterráneo.

D = Descargas aflorando en forma de manantiales o corrientes superficiales.

R = Recarga en el área de balance

B = Descarga por pozos de bombeo

S_h = Descarga por flujo subterráneo

ΔV = Cambio en almacenamiento

Ecuación General: **$E_h + R - S_h - D - B = \pm \Delta V$**

1) Oct. 1970- Mayo 1977 $17.7 + R - 11.6 - 0 - 56 = - 154 \text{ S}$

2) Mayo - Oct. 1977 $1.1 + R - 0.7 - 0 - 2.8 = 129.6 \text{ S}$

Los resultados que se obtendrían al resolver este sistema tal como está planteado carecían de sentido físico, puesto que cada ecuación representa intervalos de tiempo diferentes. La recarga así obtenida sería la misma en los dos intervalos, lo cual no es lógico.

Como el objetivo principal del balance es determinar la recarga media anual al acuífero, para obtener resultados más o menos aceptables del sistema planteado, podrían hacerse las consideraciones siguientes:

En la primera ecuación correspondiente al intervalo Oct. 1970 – Mayo 1977 (6.6 años de precipitación media), se consideró que la distribución anual de la recarga fue constante. En la segunda ecuación correspondiente al intervalo Mayo –Octubre de 1977 (temporada de lluvias del último ciclo anual), se consideró que la recarga vertical que tuvo lugar en ese intervalo, es representativa de la última recarga anual.

De acuerdo con estas consideraciones el sistema de ecuaciones es el siguiente:

1) Oct. 1970-Mayo 1977 $17.7 + 6.6 R - 11.6 - 56 = -154 \text{ S}$

2) Mayo - Oct. 1977 $1.1 + R - 0.7 - 2.8 = 129.6 \text{ S}$

Resolviendo este sistema, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$S = 0.033$$

$$R = 6.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

A primera vista, la solución es aceptable, sin embargo, de acuerdo con los materiales que constituyen el acuífero de este valle: gravas, arenas, limos y arcillas, es lógico suponer que el coeficiente de almacenamiento S, o rendimiento específico del acuífero sea más alto que el valor obtenido. En acuíferos libres constituidos por los materiales mencionados, el coeficiente de almacenamiento varía entre 0.05 y 0.15. Aplicando diferentes cifras de este rango de valores de S en las ecuaciones originalmente planteadas se obtienen los siguientes volúmenes de recarga:

PERIODO	ECUACIÓN
1) Oct. 1970 – Mayo 1977	$R = 49.9 - 154 S$
2) Mayo - Oct. 1977	$R = 2.4 + 129.6 S$

Período Octubre 1970-Mayo 1977

S	R 10 ⁶ m ³	Rt R+Eh 10 ⁶ m ³	Dt B+Sh 10 ⁶ m ³	⊗V (m) 10 ⁶ m ³	⊗h (m) 10 ⁶ m ³	⊗h Balance	Config.
0.05	42.2	59.9	67.6	-7.7	3.40	-3.29	
0.08	37.6	55.3	67.6	-12.3	-3.38		
<u>0.10</u>	34.5	52.2	67.6	-15.4	<u>-3.30</u>		
0.12	31.4	49.1	67.6	-18.5	-3.33		
0.15	26.8	44.5	67.6	-23.1	-3.33		

Período Mayo-Octubre 1977

S	R 10 ⁶ m ³	Rt R+Eh 10 ⁶ m ³	Dt B+Sh 10 ⁶ m ³	⊗V (m) 10 ⁶ m ³	⊗h (m)	⊗h Balance	Config.
0.05	8.9	10.0	3.5	6.5	+2.80	<u>+2.82</u>	
0.08	12.8	13.9	3.5	10.4	+2.88		
0.10	15.3	16.4	3.5	12.9	+2.80		
<u>0.12</u>	17.9	19.0	3.5	15.5	<u>+2.83</u>		
0.15	21.8	22.9	3.5	19.4	+2.80		

Como puede observarse en los cuadros anteriores, las soluciones más aceptables corresponden a valores de S entre 0.10 y 0.12.

Los volúmenes de recarga R, son del mismo orden de magnitud y la evolución del nivel estático obtenida a partir del cambio en almacenamiento $\otimes V$, el área de balance y el coeficiente de almacenamiento aplicado, tiene los valores más próximos a los obtenidos mediante las configuraciones de evolución del nivel estático en cada uno de los intervalos considerados. A la primera solución, S = 0.10, se le puede atribuir mayor validez debido a que toma en cuenta un intervalo de varios años con precipitaciones medias.

Para fines prácticos y con el objeto de calcular la recarga media anual en los dos intervalos considerados, se adoptó el valor de 0.10 para el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

De los cuadros anteriores se obtuvieron los siguientes volúmenes de recarga:

Período Octubre 1970 – Mayo 1977 (6.6 años)

Recarga Vertical $R = 5.2$ millones de $m^3/año$
Recarga Total $R_t = B + E_h = 7.9$ millones de $m^3/año$
Descarga Total $D_t = B + S_h = 10.3$ millones de $m^3/año$
Cambio de almacenamiento $\otimes V S = -2.4$ millones de $m^3/año$
Abatimiento de los Niveles $\otimes h = 0.50$ m/año

Período Mayo – Octubre de 1977

Recarga vertical $R = 15.3$ millones de m^3
Recarga Total $R_t = R + E_h = 16.4$ millones de m^3
Descarga Total $D_t = B + S_h = 3.5$ millones de m^3
Cambio en el almacenamiento $\otimes V = +12.9$ millones de m^3
Recuperación de los niveles $\otimes h = 2.8$ metros

Si extrapolamos a un año los valores de E_h , S_h , se puede tener una idea aproximada de la recarga al acuífero en el último ciclo anual que corresponde a un año de lluvias abundantes.

$$R = 15.3 \text{ millones de m}^3/\text{año}$$

$$R_t = R + E_h = 15.3 + 2.7 = 18 \text{ millones de m}^3/\text{año}$$

$$D_t = B + S_h = 8.5 + 1.7 = 10.2 \text{ millones de m}^3/\text{año}$$

$$\otimes V = 7.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\otimes h = 2.8 \text{ metros}$$

La recarga media anual en el período total de observaciones Octubre- 1970-Octubre 1977 y las condiciones actuales de explotación en que se encuentra actualmente el acuífero, se obtienen al plantear una ecuación para ese intervalo.

$$1) \text{ Oct. 1970- Mayo 1977} \quad R = 49.9 - 154 S$$

$$2) \text{ Mayo - Oct 1977} \quad R = 2.4 + 129.6 S$$

$$3) \text{ Oct. 1970- Oct 1977} \quad R = 52.3 - 24.4 S$$

Como $S = 0.10$

$$R = 54.7 \text{ millones de m}^3/7 \text{ años}$$

$$R = 7.8 \text{ millones de m}^3/\text{año} \quad \text{Recarga Vertical}$$

La recarga Total al acuífero es:

$$R_t = 7.8 + 2.7 = 10.5 \text{ millones de m}^3/\text{año}$$

$$D_t = 8.5 + 1.7 = 10.2 \text{ millones de m}^3/\text{año}$$

Por lo tanto, se concluye que en un intervalo de 7 años, de los cuales, 6 corresponden a años de precipitación media y una a lluvias abundantes (1977); resulta que la recarga y descarga del acuífero estaría prácticamente balanceadas.

Tramo Mazocahui – Aconchi

La extensión superficial del acuífero en este tramo es de unos 30 km² para efectuar el balance de aguas subterráneas, solamente se dispuso de la información necesaria para plantear una ecuación. Esta ecuación corresponde al intervalo Mayo – Octubre de 1977, en el cual se considera que tuvo lugar la recarga del acuífero como consecuencia de las lluvias ocurridas en ese intervalo; en efecto, los niveles del agua recuperaron en la mayor parte de las obras de captación.

La ecuación de balance de agua subterránea utilizada es la siguiente:

$$Eh + R - Sh - D - B = \Delta V'S$$

El significado de los términos es el mismo que se ha venido dando en los balances anteriores. El comportamiento del acuífero en este tramo del Río Sonora, se diferencia del anterior (Aconchi-Banámichi) por las descargas permanentes del acuífero, que afloran a lo largo del río, desde Baviácora hasta Mazocahui.

Estas descargas fueron aforadas en la época de secas sobre el cauce del Río a la salida del valle, en promedio el caudal de descarga fue de unos 110 lps.

En las tablas correspondientes se presentan los valores en millones de m³ de los términos de la ecuación planteada. Aplicando estos valores de los términos correspondientes tiene:

PERIODO	ECUACIÓN
Mayo-Octubre 1977	$0. + R - 0.6 - 1.4 - 0.8 = 15.3 S$ $R = 2.1 + 15.3 S$

Adoptando el mismo coeficiente de almacenamiento S, de 0.10, obtenido para la otra porción de acuífero (Banámichi-Aconchi), se deduce que la recarga vertical del acuífero en el tramo Mazocahui – Aconchi fue de 3.6 millones de m³.

En ese mismo intervalo la recarga total fue de 4.3 millones de m³ y la descarga total de 2.8 millones de m³, la diferencia entre estos volúmenes corresponde al cambio en el almacenamiento reflejándose en los niveles del agua, los cuales tuvieron una recuperación media en toda el área de balance de unos 50 cm.

Ahora bien, como ya se ha mencionado anteriormente, el intervalo considerado Mayo – Octubre de 1977, correspondió a una temporada de lluvias abundantes en la zona de estudio, comparada con las lluvias anuales que tuvieron lugar de Octubre de 1970 a Mayo de 1977.

Por lo tanto, es lógico suponer que en años de precipitación media a menor, la recarga del acuífero es menor que la obtenida en el intervalo considerado; aunque es muy aventurado estimar el valor de la misma.

Sin embargo, de acuerdo con el comportamiento actual del acuífero, hay bases para suponer que existe la condición de flujo establecido: a lo largo del río Sonora todavía se presentan descargas naturales del acuífero con un régimen más o menos permanente; por lo que puede considerarse que la recarga y descarga del acuífero se encuentran aproximadamente balanceadas. Este hecho se apoya también en las configuraciones del nivel estático, las cuales no reflejan ningún efecto de sobreexplotación.

Con la información obtenida, fue posible estimar el volumen anual de descarga, el cual está integrado por la salida por flujo subterráneo Sh , el bombeo B , y las descargas que afloran a lo largo del río D , los volúmenes correspondientes son:

$$Sh = 1.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$B = 2.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$D = 3.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$Dt = 7.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

La estimación efectuada, permite inferir que el volumen de recarga al acuífero es de unos 7 millones de $\text{m}^3/\text{año}$.

Los resultados del balance pueden resumirse en la forma siguiente: la recarga y descarga del acuífero se encuentra en equilibrio.

El volumen renovable del acuífero está siendo totalmente aprovechado, ya que incluso las descargas que afloran a lo largo del río se emplean en el área del Cahui con fines agrícolas.

Cualquier explotación adicional será a costa del almacenamiento subterráneo.

Valle Banámichi – Sinoquipe

De los valles en que se dividió la subcuenca del Río Sonora para la evaluación de la recarga de los acuíferos; éste es el último de ellos que se encuentra aguas arriba de Banámichi y es muy pequeño, la extensión superficial del acuífero es de apenas unos 8 km^2 ; sin embargo, de ahí se obtiene un volumen de agua subterránea relativamente importante. Los datos disponibles no son suficientes para plantear un balance de agua subterránea en esta porción del acuífero; no obstante, del comportamiento del acuífero se puede tener una idea del orden de magnitud del volumen de recarga.

Las configuraciones del nivel estático no reflejan cualitativamente ningún efecto de sobreexplotación, es decir, el esquema natural de flujo subterráneo no se ha visto modificado notablemente, todavía sigue sensiblemente la misma dirección del río Sonora.

Sin embargo, puede afirmarse que los niveles del agua han descendido. Este hecho se apoya en la Captación de agua subterránea conocida con el nombre de "Tajo o Galería Banámichi" localizada a la salida del valle.

Actualmente estas obras captan el agua a unos 4 metros de profundidad con respecto a la superficie del terreno. Originalmente en el sentido donde se construyó esta obra, el agua descargaba en forma de manantial.

El descenso de los niveles del agua debió haberse iniciado con el bombeo de las obras perforadas aguas arriba. Actualmente por medio de esta galería se han logrado captar caudales de agua subterránea que varían entre unos 85 y 600 lps, dependiendo de la época del año.

El caudal máximo se alcanza en época de lluvias y el mínimo al término de la época de secas. Se estima que el volumen anual de explotación por medio de esta galería es de unos 6.5 millones de m³.

Aún con esta explotación y la que se efectúa por el bombeo de 2.3 millones de m³/año, el esquema de flujo no se ha deformado notablemente

De lo anterior, se concluye que la recarga del acuífero debe ser un poco menor que la explotación; sin embargo, considerando un intervalo de varios años (10) en el que por lo menos en uno se presentan lluvias abundantes como las de 1977 la recarga y la descarga del acuífero estarían aproximadamente balanceadas.

Esta conclusión se apoya en el comportamiento de los niveles del agua observado en todas las obras de captación: En el intervalo Mayo – Octubre de 1977, los niveles estáticos experimentan una recuperación media en todo el valle de 2.8 metros.

De la información obtenida, se estima que las descargas del acuífero están integradas como sigue:

Tajo o Galería Banámichi	6.5 millones de m ³ /año
Bombeo por medio de pozos y norias	2.3 millones de m ³ /año
Salidas por flujo subterráneo	2.7 millones de m ³ /año

Descarga total = 11.5 millones de m³/año

La recarga del acuífero en el Valle Banámichi – Sinoquipe, es de 11 millones de m³/año, similar a la descarga.

Actualmente se está utilizando el total del volumen renovable del acuífero de este valle. Cualquier incremento en las extracciones sería a costa del almacenamiento subterráneo, provocando con ello el abatimiento progresivo de los niveles del agua, el cual afectaría en primer lugar a la Galería Banámichi, que para seguir manteniendo su régimen de extracción por algún tipo, tendría que seguirse profundizando y muy probablemente los caudales captados se verían substancialmente disminuidos.

En el acuífero Río Sonora en el tramo comprendido entre el Valle de Sinoquipe y el Valle de Ures, el acuífero recibe una recarga media anual de **66.7 millones de m³**, la cual asciende hasta 81.6 millones de m³ en períodos de lluvias abundantes.

8 DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; en su fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA} & = & \text{RECARGA} & - & \text{DESCARGA} & - & \text{EXTRACCIÓN DE} \\ \text{ANUAL DE AGUA DEL} & & \text{TOTAL} & & \text{NATURAL} & & \text{AGUAS} \\ \text{SUBSUELO EN UN} & & \text{MEDIA} & & \text{COMPROMETIDA} & & \text{SUBTERRÁNEAS} \\ \text{ACUÍFERO} & & \text{ANUAL} & & & & \end{array}$$

Donde:

- DMA** = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero
- R** = Recarga total media anual
- DNC** = Descarga natural comprometida
- VEAS** = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **66.7 hm³/año**.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso, su valor es de **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **62,956,438 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

La disponibilidad de aguas subterráneas, constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 66.7 - 0.0 - 62.956438 \\ \text{DMA} &= 3.743562 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **3,743,562 m³ anuales.**