



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE MEXICALI (0210), ESTADO DE
BAJA CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	6
3.1 Provincia fisiográfica	6
3.2 Clima	6
3.3 Hidrografía.....	7
3.4 Geomorfología.....	7
4. GEOLOGÍA.....	8
4.1 Estratigrafía	9
4.2 Geología estructural	10
4.3 Geología del subsuelo.....	11
5. HIDROGEOLOGÍA.....	11
5.1 Tipo de acuífero.....	11
5.2 Parámetros hidráulicos	12
5.3 Piezometría.....	12
5.4 Comportamiento hidráulico.....	13
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	13
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	13
5.4.3 Evolución del nivel estático	14
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA DEL BOMBEO	15
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	16
7.1 Entradas.....	17
7.2 Recarga natural (Rn).....	17
7.2.1 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	17
7.2.2 Recarga inducida (Ri)	20
7.3 Salidas	20
7.3.1 Evapotranspiración (ETR).....	20
7.3.2 Bombeo (B)	21
7.3.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)	21
7.4 Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	22
8. DISPONIBILIDAD	23
8.1 Recarga total media anual (R).....	23
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	23
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	24
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24
9. BIBLIOGRAFÍA	25

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 Valle de Mexicali, definido con la clave 0210 por la Comisión Nacional del Agua, se ubica en el extremo norte del estado de Baja California, en el municipio de Mexicali. Colinda al norte con Estados Unidos de América, al este con el acuífero Valle de San Luis Río Colorado, Sonora, al oeste con el acuífero Laguna Salada y al sur con el acuífero El Chinero y el Golfo de California.

El acuífero cubre una superficie de 4908 km² (figura 1) y se localiza entre los paralelos 32° 43' 7.2" y 31° 38' 52.3" de latitud norte y 115° 48' 54.2" y 114° 43' 8.9" de longitud oeste del Meridiano de Greenwich.

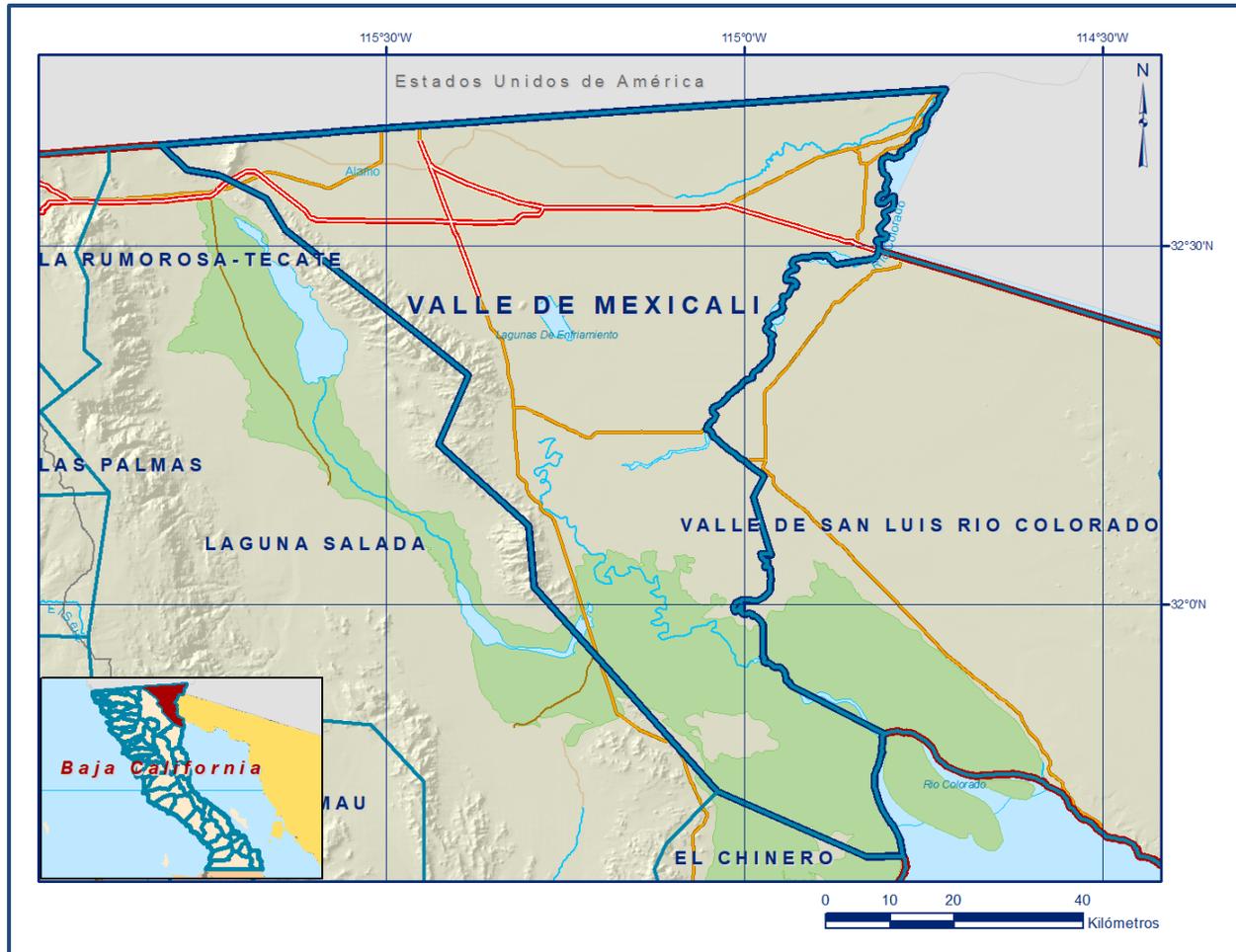


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUÍFERO 02D VALLE DE MEXICALI							OBSERVACIONES
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	43	8.9	32	43	7.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL (POR EL CAUCE DEL RIO COLORADO)
2	114	48	43.8	32	29	39.5	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL (POR EL CAUCE DEL RIO COLORADO)
3	115	3	9.0	32	14	41.4	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	114	48	14.4	31	49	10.3	DEL 4 AL 5 POR LA LINEA DE BAJE AMAR A LO LARGO DE LA COSTA
5	114	46	40.7	31	38	55.1	
6	114	49	45.7	31	38	52.3	
7	115	2	17.4	31	44	22.0	
8	115	17	34.4	32	1	26.6	
9	115	18	5.1	32	6	33.7	
10	115	25	36.4	32	13	23.8	
11	115	23	4.1	32	19	10.3	
12	115	27	22.2	32	22	41.7	
13	115	38	25.0	32	31	18.8	
14	115	40	5.6	32	33	58.0	
15	115	43	58.8	32	35	54.2	
16	115	46	39.3	32	36	22.7	
17	115	48	54.2	32	38	27.2	DEL 17 AL 1 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
1	114	43	8.9	32	43	7.2	

La actividad económica de mayor importancia en el Valle de Mexicali es la agricultura, donde se desarrollan cultivos cíclicos y perennes que hacen de esta zona el distrito de riego más importante de la República. Los principales cultivos son el algodón y el trigo, además del maíz, sorgo, alfalfa y espárrago, entre otros. Como actividades adicionales destacan la ganadería, la pesca, la industria, el comercio y el turismo.

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece a la región Hidrológico-Administrativa I “Península de Baja California” y se encuentra sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda tipo III para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado el 15 de mayo de 1965. La veda establece que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. Menciona que *“Excepto cuando se trate de alumbramientos para usos domésticos, desde la vigencia de este Decreto, nadie podrá extraer aguas del subsuelo dentro de la zona vedada ni modificar los aprovechamientos existentes sin previo permiso por escrito de la Autoridad del Agua, la que sólo concederá permisos únicamente en los casos en que de los estudios relativos se concluya que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse”*.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 02 VALLE DE MEXICALI							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	114	43	8.9	32	43	7.2	DEL 1 AL 2 POR EL LIMITE INTERNACIONAL (POR EL CAUCE DEL RIO COLORADO)
2	114	48	43.8	32	29	39.5	DEL 2 AL 3 POR EL LIMITE ESTATAL (POR EL CAUCE DEL RIO COLORADO)
3	115	3	9.0	32	14	41.4	DEL 3 AL 4 POR EL LIMITE ESTATAL
4	114	48	14.4	31	49	10.3	DEL 4 AL 5 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
5	114	46	40.7	31	38	55.1	
6	114	49	45.7	31	38	52.3	
7	115	2	17.4	31	44	22.0	
8	115	17	34.4	32	1	26.6	
9	115	18	5.1	32	6	33.7	
10	115	25	36.4	32	13	23.8	
11	115	23	4.1	32	19	10.3	
12	115	27	22.2	32	22	41.7	
13	115	38	25.0	32	31	18.8	
14	115	40	5.6	32	33	58.0	
15	115	43	58.8	32	35	54.2	
16	115	46	39.3	32	36	22.7	
17	115	48	54.2	32	38	27.2	DEL 17 AL 1 POR EL LIMITE INTERNACIONAL
1	114	43	8.9	32	43	7.2	

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. Dentro de la superficie que cubre el acuífero se encuentra asentado el Distrito de Riego No. 014 “Río Colorado”. No se ha constituido hasta la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

Existe una gran cantidad de información derivada de estudios hidrogeológicos realizados que hacen que esta zona sea la más estudiada del país. Sin embargo, sólo mencionaremos los estudios que se consideran más importantes para la elaboración del presente documento.

En 1975 se realizó, por parte de Gordon Gastil, Richard P. Phillips y Edwin C. Allison, el estudio geológico denominado Reconnaissance Geology of the State of Baja California, que fue contratado debido a la necesidad de cartografiar la geología de Baja California a nivel regional y estudiar los eventos geológicos para integrarlos en el marco regional. Como resultado importante se obtuvo un plano geológico a escala 1:250,000, además se estableció una división de la geología histórica en los siguientes eventos: prebatolítico, emplazamiento en rocas batolíticas con sus cuatro zonas metamórficas, y post-batolítico, este último desde hace 90 millones de años.

Estructuralmente se clasificó al Estado de Baja California en: Península Oriental y Central Estable, Litoral Continental Inestable y Depresión del Golfo.

En 1977 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), realizó un estudio de carácter geohidrológico en el Valle de Mexicali B.C. y Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado, Son.; dicho trabajo consistió en determinar si los acuíferos del área se ubican en sedimentos cuaternarios de relleno aluvial. Las interpretaciones de los registros geofísicos permitieron correlacionar los depósitos de sedimentos donde se localizan los mantos acuíferos. Se obtuvieron también datos de piezometría, características geohidrológicas y calidad del agua.

En 1999-2000 la Empresa Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V. efectuó el Estudio para la reactivación de redes de monitoreo piezométrico del acuífero Valle de Mexicali B.C. Con el objetivo de analizar y evaluar la red de monitoreo actual para optimizar y rediseñar la red de piezometría.

En el año 2004, la Comisión Nacional del Agua a través de la Subgerencia de Exploración y Monitoreo realizó mediciones piezométricas y configuraciones del acuífero Valle de Mexicali, interpretación de pruebas de bombeo y análisis hidrogeológico, específicamente en la porción norte del acuífero, con el objetivo de analizar la influencia del canal Todo Americano en el acuífero. Información que se presenta en el reporte técnico No. GAS/SEMG/2005/01.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las Provincias Fisiográficas la zona se encuentra ubicada dentro de la Provincia Llanura Sonorense (II) (INEGI, 1997), la cual está constituida por sierras paralelas con orientación nor-noroeste a sur-sureste, separadas por llanuras extensas. Las rocas en esta provincia tienen un rango cronoestratigráfico que varía del Precámbrico al Reciente.

3.2 Clima

Con base en los datos de precipitación, temperatura y evaporación monitoreados en las estaciones climatológicas, la zona se caracteriza principalmente por un clima muy seco muy cálido a cálido, indicado como BW(h') en la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García (1970).

La temperatura media anual es de 22.3° C, con una mínima debajo de 0° C y máxima de 50° C; el período caluroso del año es de julio a septiembre siendo diciembre y enero los meses más fríos. En la zona se presentó una precipitación media anual de 82.9 mm, durante el periodo 1969-1999. La evaporación potencial media anual es de 2316 mm.

3.3 Hidrografía

En la zona están definidos dos sistemas de drenaje: uno formado por El Río Colorado que desemboca en el Golfo de California, y otro sistema que drena hacia el Mar de Saltón a través de los Ríos Álamo y Nuevo en territorio Mexicano, y el Río Coachella en E.U.A. El Río Colorado atraviesa la planicie con dirección NE-SW y en la medida que avanza hacia el sur ha dejado a través del tiempo, y por su carácter senil, numerosos meandros abandonados y pequeñas lagunas actualmente incorporadas a tierras de cultivo. La zona se encuentra dentro de la Región Hidrológica No.7 "Río Colorado". El área corresponde a la Cuenca del Río Colorado.

3.4 Geomorfología

Como resultado de la caracterización geomorfológica del área se definen unidades geomorfológicas de segundo orden como las Sierras de Cucapás, del Mayor y el Cerro del Centinela que se alinean en dirección NW-SE. Estas estructuras geomorfológicas de segundo orden tienen su origen en los eventos de diastrofismo.

La geoforma de mayor extensión es la llanura que comprende el Valle de Mexicali, localizada sobre la margen derecha del Delta del Río Colorado; está limitada en la porción noreste por la Mesa de Andrade, al noroeste continúa adentrándose en el Valle Imperial de los E.U.A., al sur queda abierta, al oriente queda limitada por la Mesa de San Luis y al poniente por el conjunto de Sierras Los Cucapás, El Mayor y Cerro del Centinela. La llanura está surcada en su totalidad por cauces abandonados, sobresaliendo algunos tramos con rumbos divagantes que dan lugar a la formación de meandros. Como geoformas generadas por la acción fluvial dentro del delta están las terrazas, ubicadas aisladamente entre los cauces de los arroyos abandonados.

Las terrazas aluviales constituyen otras unidades geomorfológicas típicas de la región; las cuales se localizan rodeando a las Sierras de los Cucapás y El Mayor, y se presentan en franjas alargadas de gran longitud, con superficies aplanadas y de aproximadamente 15 m de altura con respecto a la llanura.

Por último, otra geoforma de considerable extensión la constituyen las Mesas de San Luis y de Andrade, formadas por depósitos eólicos que conforman médanos en forma de media luna.

Con respecto a la relación geomorfología-movimiento del agua subterránea, se infiere que la llanura construida por el Delta del Río Colorado es un indicador del movimiento del agua subterránea, sugiriendo un flujo horizontal que sigue la dirección del cauce del Río Colorado u otras paleocorrientes.

Por otra parte, en el Valle de Mexicali no existe una clara distinción de las zonas de recarga en las partes altas de la zona; la recarga de la región proviene principalmente de las infiltraciones del Río Colorado, canales de distribución, retornos de riego y flujo horizontal subterráneo con dirección NE-SW.

El Delta del Río Colorado, reúne las condiciones ideales para que haya una buena transmisividad (depósitos aluviales potentes y pendientes suaves) y capacidad de almacenamiento en sus formaciones, pero carece localmente de posibilidades de infiltración, por superar la evaporación potencial a la lluvia en todos los niveles, anual, mensual y diario.

4. GEOLOGÍA

El área queda comprendida en la Subprovincia de Mexicali, la que a su vez está dentro de la Provincia Geológica de Baja California.

La columna geológica comprende rocas basales metamórficas, rocas volcánicas y volcanoclásticas; la cima de la columna presenta sedimentos de terrazas Terciarios y Cuaternarios, así como depósitos aluviales y fluviales.

En la zona destaca un sistema de fallas de movimiento lateral, orientado a NW-SE de desplazamiento derecho. En la figura 2 se presenta un mapa geológico simplificado en el que se muestra la distribución de las unidades litológicas.

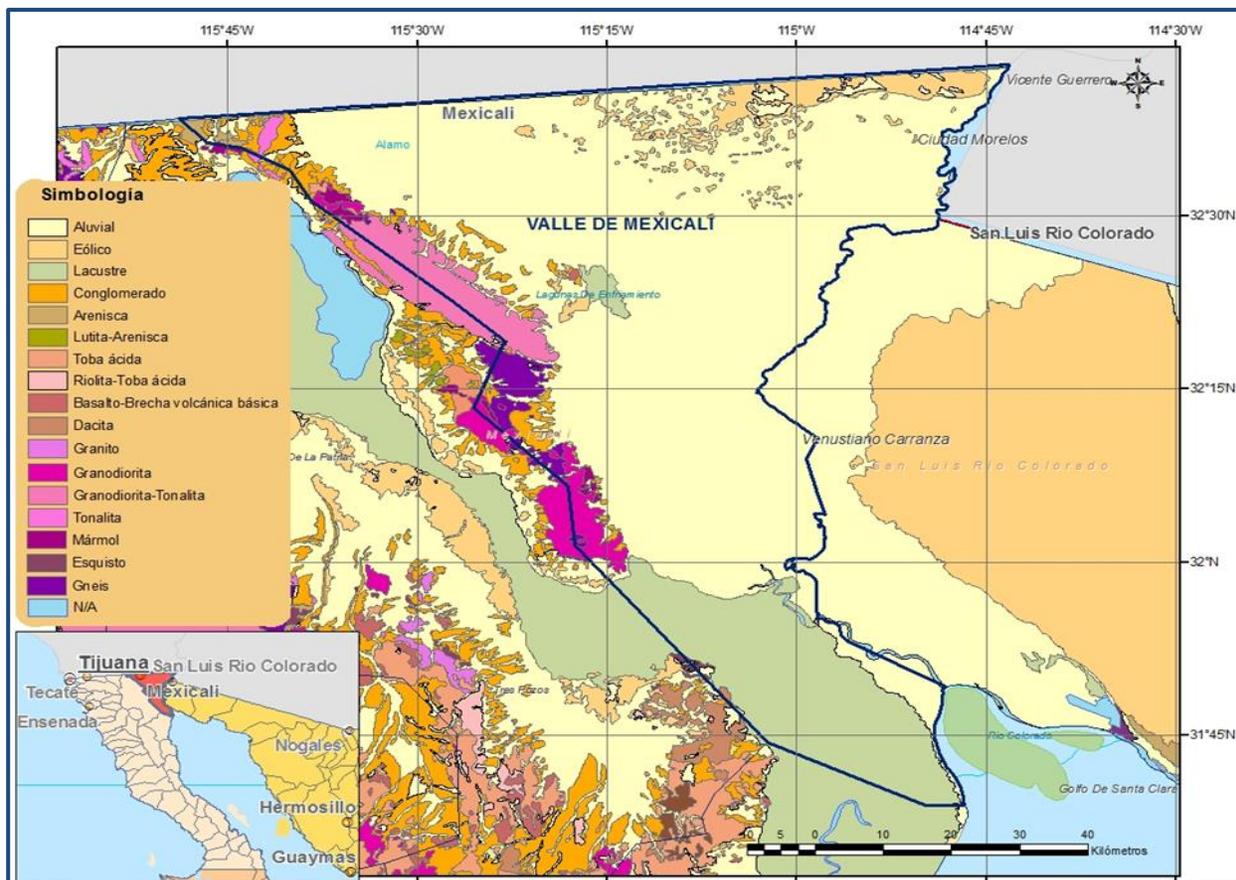


Figura 2. Geología general del acuífero.

4.1 Estratigrafía

Las rocas más antiguas para la Cuenca del Delta del Río Colorado son rocas del Paleozoico Superior (?) de origen sedimentario, representadas por calizas con fósiles de crinoides y corales; subiendo estratigráficamente, continúan rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con diversos grados de metamorfismo, asignadas al sistema Triásico Inferior. Las rocas Triásicas afloran desde la Alta California “Riverside”, continuando a la Sierra Juárez, este conjunto estrato-tectónico se distingue porque en los afloramientos se observan rocas graníticas y tonalitas bordeadas por gneises y esquistos. Woodford y Harris (1938), reconocen gneises graníticos toscamente bandeados y numerosas pegmatitas e inyecciones gnéicas que agruparon en la Formación Santa Eulalia; también se identificaron pizarras, mica-esquistos, calizas con abundantes fósiles y rocas metavolcánicas, a las que denominaron Formación San Telmo. Morán (1984), identificó rocas del Cretácico Inferior, constituidas por rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias; que afloran en la Sierra de Cucapás y El Mayor.

El Cenozoico se caracteriza en general por unidades de rocas sedimentarias continentales (Consultores, 1996). En el Paleoceno y Eoceno, se presentan principalmente sedimentos terrígenos originados por el delta del Colorado (Gastil et al., 1975 in Consultores op. cit.).

Finalmente, en la cima de la columna estratigráfica y dominando el Valle de Mexicali, se encuentran sedimentos fluvio-deltáicos, terrazas aluviales y depósitos eólicos (Consultores, op. cit.); los sedimentos deltaicos están constituidos básicamente por arcillas, limos, arenas y gravas, con coloraciones de café claro y tintes anaranjados, presentan una estratificación gruesa (3 m) y estructuras laminares en los sedimentos finos. Esta litología se observa al oriente de la presa Morelos y al sur de Cerro Prieto.

Las terrazas aluviales se distribuyen principalmente al occidente del valle rodeando las partes bajas de las Sierras de Cucapás y el Mayor, la litología de estas terrazas consiste en arenas y gravas de fragmentos ígneos, poco consolidados, distribuidos en la parte superior; en la porción media se encuentran arena y grava no consolidadas de color rojizo; la base se forma por limo y arena color rojizo de estratificación laminar.

Por último, los depósitos eólicos se localizan en la porción norte y oriental del valle; están constituidos por arenas finas cuarcíferas, de estratificación delgada, con estructuras oblicuas, de color gris amarillento a gris claro y conforman estructuralmente dunas y barchanes.

4.2 Geología estructural

El marco estructural que se observa en el área ha sido moldeado por una serie de eventos que se desarrollaron en la margen occidental de Norteamérica, desde el Paleozoico hasta nuestros días. En particular, el Valle de Mexicali está formado por un sistema de fallas normales que dan origen a una fosa, (Consultores, S.A.1996).

Por otra parte, en la zona se pueden observar tres lineamientos principales con rumbos que varían de 30° a 50° al NW; estos lineamientos se asocian a un sistema de fallas de desplazamiento lateral de sentido dextral y se consideran de gran importancia en relación a la ocurrencia y movimiento del agua subterráneas, porque su presencia permite una comunicación vertical de la columna estratigráfica como se ha demostrado en la zona geotérmica de Cerro Prieto.

4.3 Geología del subsuelo

La interpretación geológica del subsuelo en el valle se realizó a partir de la información proporcionada por los estudios de pozos de la DAS (SRH), los cuales corroboran depósitos de sedimentos de tipo aluvial con estratificación oblicua; estos depósitos presentan un predominio de sedimentos de arena y grava, con un aumento del contenido de arcilla y limo hacia la parte poniente del delta del Colorado y la Ciudad de Mexicali.

Puente y de la Peña 1978 (*in* Consultores, S. A., 1996), describen la presencia de tres grandes unidades rocosas: la primera unidad que es la más somera, está constituida por sedimentos de relleno no consolidados donde se ubican los mantos acuíferos; la segunda unidad está formada por lutitas y areniscas; la tercera unidad corresponde con una unidad granítica, la cual es considerada como el basamento, y llega a alcanzar profundidades de 6500 m. Estructuralmente se interpreta un conjunto de fallas normales de forma escalonada, a partir de la Sierra de Cucapás, que configuran la fosa del valle.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

El sistema fluvio-deltáico del Río Colorado ha desarrollado potentes depósitos sedimentarios, que varían en espesor de 600 hasta posiblemente 4000 m (CNA, 1999) y que conforman el medio granular del acuífero.

Estos sedimentos son de diversa granulometría, desde arena, grava y limo hasta arcilla, con una distribución de carácter errático y una estratificación ocasionalmente oblicua; estas características sedimentológicas y la alta permeabilidad de los materiales originan una fuente anisotrópica, con alta relación de permeabilidad horizontal-vertical y con dirección preferencial de flujo horizontal.

Subyace a los sedimentos de relleno una secuencia de lutitas, areniscas y limolitas fracturadas que cubre al basamento. Dicho fracturamiento ha permitido la comunicación entre esta unidad que constituye un medio fracturado y el medio granular.

El basamento está constituido por rocas cristalinas y afloran en la Sierra de Cucapás; estas rocas, desde el punto de vista hidrológico, son de poco interés, debido a su reducida permeabilidad.

La porción del acuífero correspondiente al medio granular se comporta como acuífero libre, mientras que aquella del medio fracturado se comporta como semiconfinado.

5.2 Parámetros hidráulicos

Las características hidráulicas del acuífero se determinaron mediante la interpretación de las pruebas de bombeo de los estudios de la SARH (1977) y CIS (1996); del primero se cuenta con 72 pruebas de bombeo de corta duración en pozos de uso agrícola y 12 pruebas de larga duración en los pozos de la Dirección de Aguas Subterráneas; del segundo estudio se cuenta con la interpretación de 12 pruebas de bombeo realizadas en 1968, las cuales cuentan con pozos de observación.

La transmisividad fluctúa de media a muy alta, con valores entre 0.05 y 0.35 m²/s, registrándose los más altos en la Mesa San Luis y en el extremo noreste del Valle de Mexicali a lo largo del Río Colorado, en la parte central del distrito de riego. Estos valores decrecen hacia el sur y oeste en el valle y hacia el suroeste en la Mesa, en las zonas de Cerro Prieto y Mexicali, considerándose los valores obtenidos de media a alta transmisividad.

El reporte Técnico No. GAS/SEMG/2005/01 se menciona que el acuífero presenta altos valores de transmisividad de 0.15 y 0.0775 m²/s en la porción norte del acuífero y que disminuyen hacia el sur, donde se estimó la transmisividad en 5x10⁻³ m²/s. El valor del coeficiente de almacenamiento, obtenido de la interpretación de las pruebas de bombeo es de 0.276.

5.3 Piezometría

Para el análisis piezométrico del Acuífero Valle de Mexicali se tomó como base la información generada por la Gerencia de Aguas Subterráneas, a través de la Subgerencia de Exploración y Monitoreo de la CONAGUA para el año 2004. Se consideró el nivel piezométrico y la profundidad de los pozos monitoreados.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

Con la información piezométrica correspondiente a 2004 se elaboró el mapa de curvas de igual profundidad al nivel estático, (figura. 3). Las menores profundidades se localizan bordeando la Mesa de Andrade en la porción norte del acuífero, donde el nivel se encuentra entre 0 y 2 m de profundidad. La mayor profundidad es de 13 m y se encuentra al oeste del poblado Ciudad Morelos.

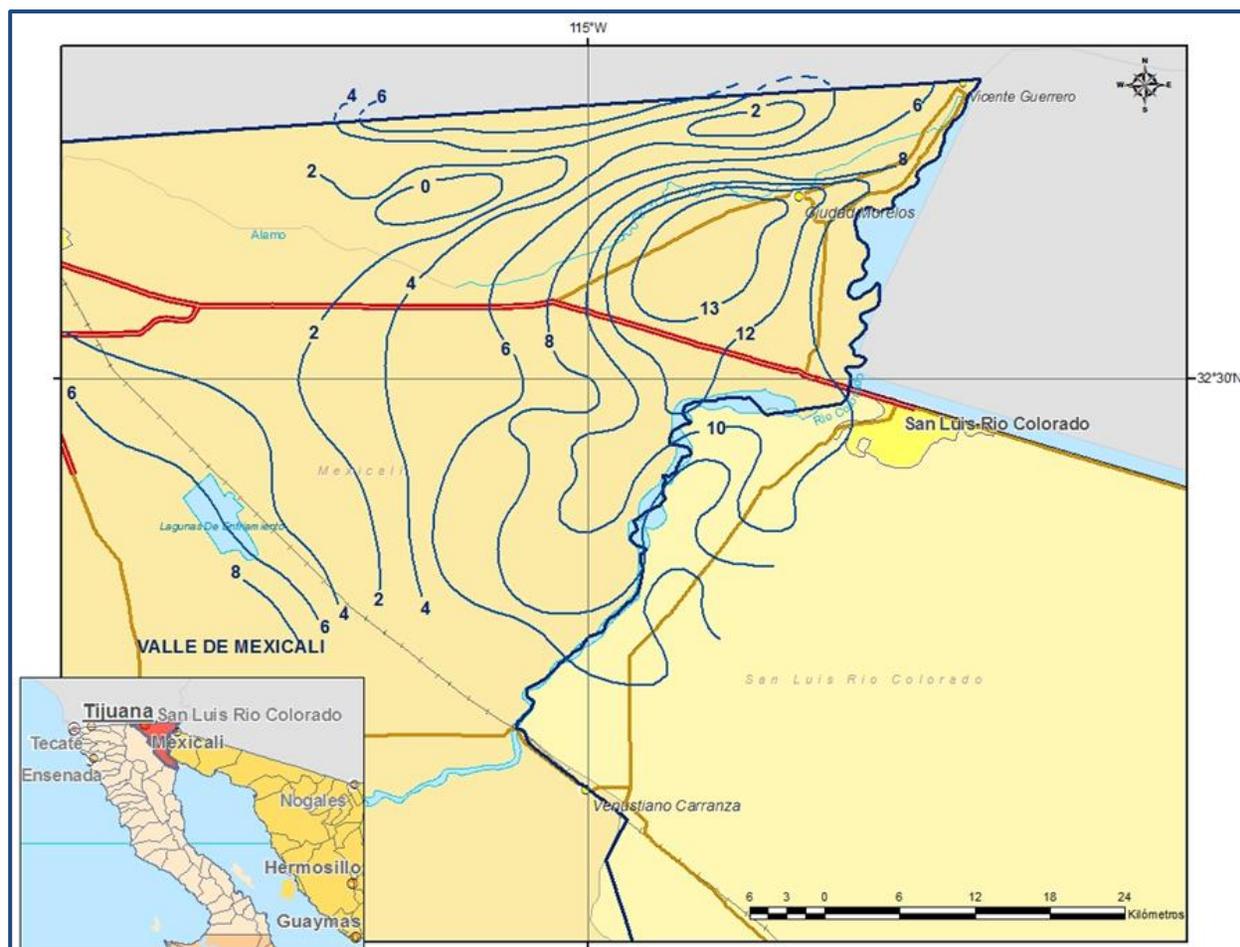


Figura 3. Profundidad al nivel estático en m (2004).

5.4.2 Elevación del nivel estático

La configuración de elevación del nivel estático para el año 2004 muestra las mayores elevaciones en la porción noreste, bordeando la Mesa de Andrade, donde alcanza 28 msnm. Las menores elevaciones son de 2 msnm en la zona de Cerro Prieto y de 4 msnm al sur en el poblado Guadalupe Victoria.

De la configuración mostrada en la figura 4, se infiere que la dirección de flujo subterráneo es de noreste a suroeste.

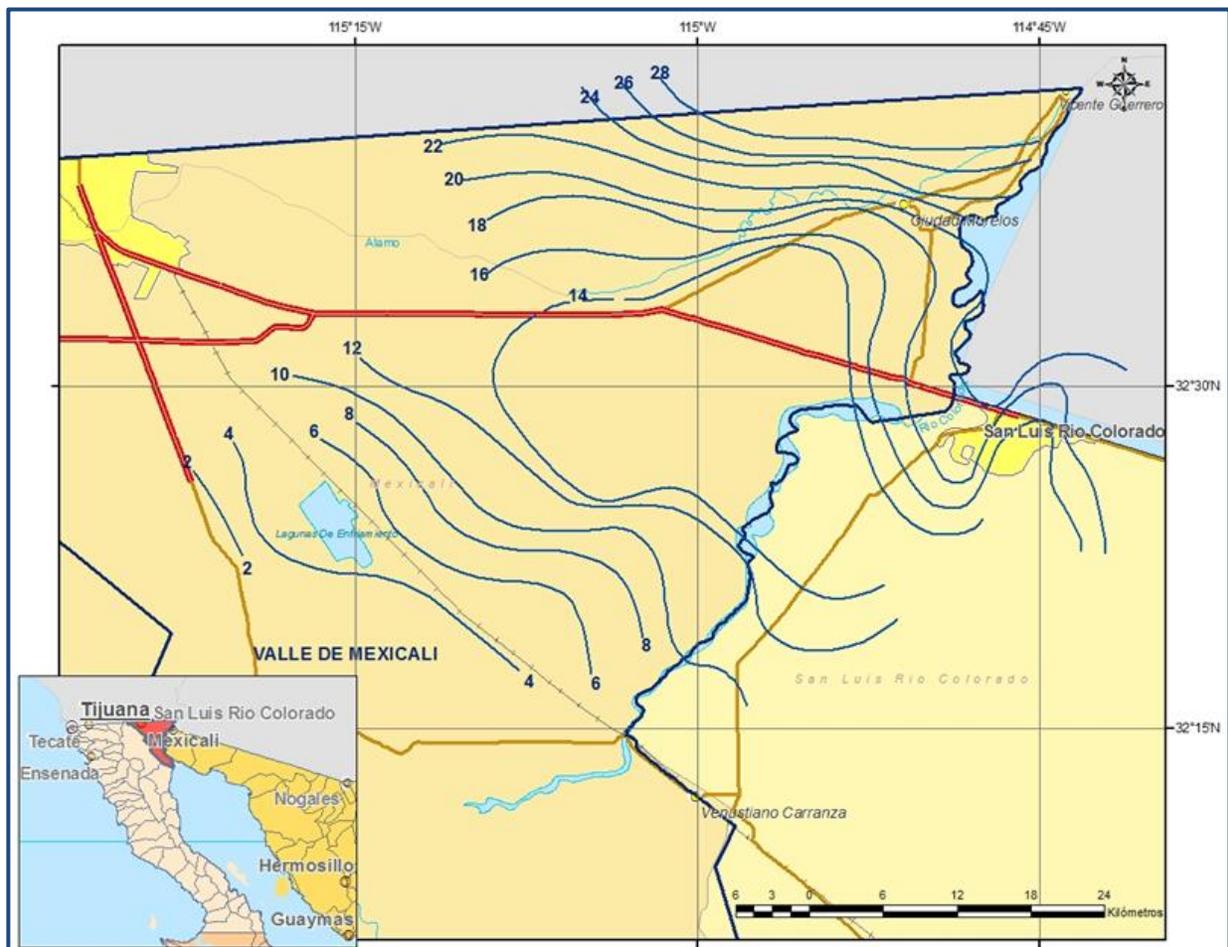


Figura 4. Elevación del nivel estático en msnm (2004)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Para el análisis de la evolución de los niveles del agua subterránea se tomó en cuenta la información piezométrica que corresponde a los años 1987 y 1999, ya que en ellos se tiene la mejor cobertura espacial de las lecturas.

En este período se observa una evolución negativa, el mayor abatimiento registrado fue de 6 m en, lo que significa un ritmo de abatimiento anual de 0.5 m.

En el área de Álamos, el descenso ha sido de 4 m para este periodo y en algunos sitios hasta de 5 m, lo cual representa un abatimiento entre 0.3 y 0.4 m al año.

En la porción occidental del acuífero, en la región de Cerro Prieto, las curvas de evolución muestran que los niveles del agua subterránea no han sufrido variaciones significativas en su posición (figura 5).

El valor promedio de abatimiento para este periodo en el acuífero varía entre 2 y 3, que representa un ritmo de abatimiento anual de 0.20 a 0.25 m.

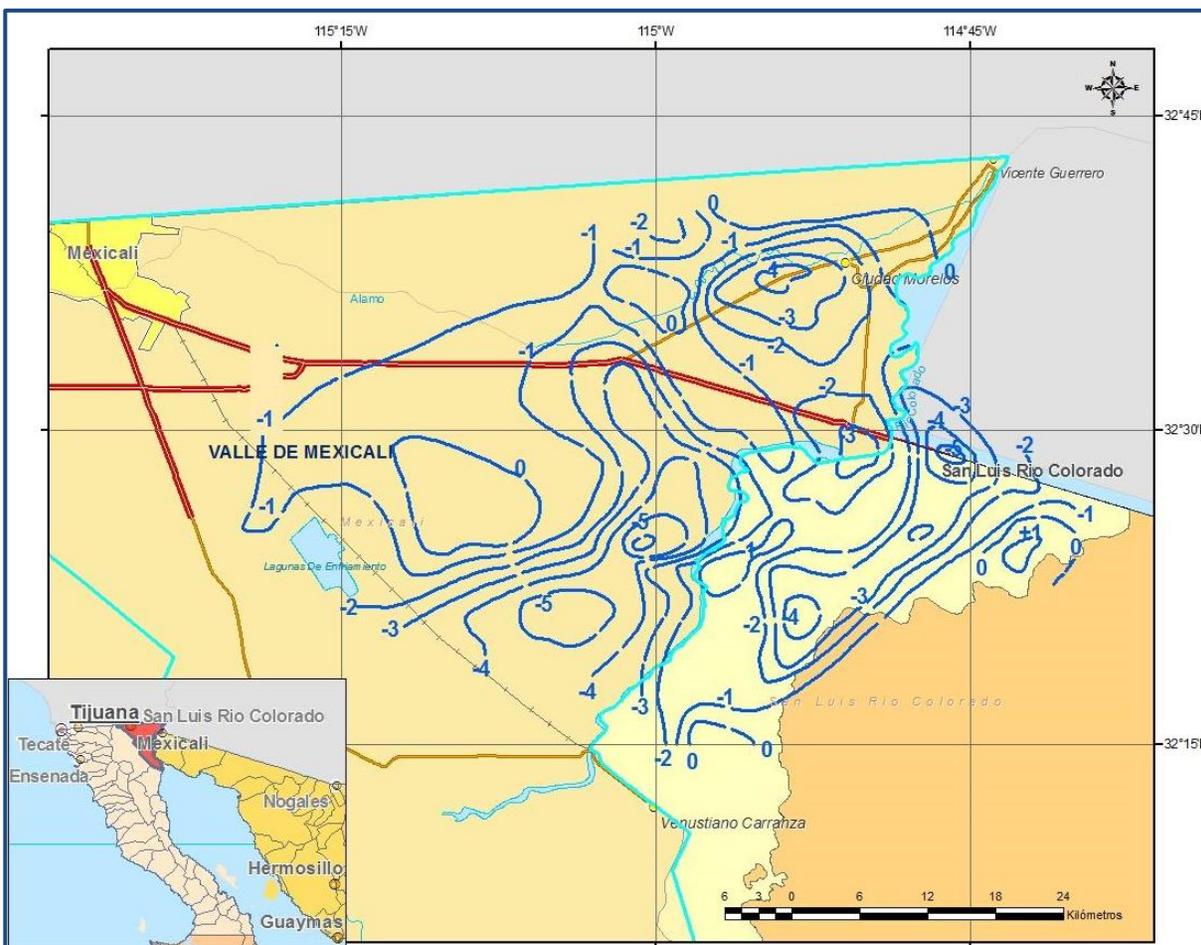


Figura 5. Evolución del nivel estático en m (1987-1999)

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA DEL BOMBEO

De acuerdo con los datos del Registro Público de Derechos del Agua (2005) existen en el acuífero un total de 1,081 pozos en el acuífero, de los cuales 192 (17.8%) se destinan al uso agrícola, 80 (7.4%) para abastecimiento de agua potable a los centros de población, 685 más (63.3%) para cubrir las necesidades del uso doméstico-abrevadero y los 124 pozos restantes (11.5%) son utilizados por el sector industrial.

El volumen de extracción conjunto se estima que es del orden de **602 hm³/año**, de los cuales 588 hm³/año corresponden al uso agrícola, 13 hm³/año al uso público urbano y 1 hm³/año para uso doméstico-abrevadero. Los pozos utilizados por el sector industrial corresponden a los que se localizan en el campo geotérmico Cerro Prieto y debido a que explotan niveles profundos en rocas fracturadas se considera que pertenecen a otra unidad acuífera.

Con la modificación al trazo del límite del acuífero, que considera al cauce del Río Colorado como la frontera con respecto al acuífero vecino Valle de San Luis Río Colorado, en el estado de Sonora, fue necesario descontar un volumen de 116 hm³/año correspondientes a las Unidades de Riego 1, 2 y 3 del Distrito de Riego 014, Río Colorado localizadas en el territorio sonorenses, de acuerdo con la Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. Antes de considerar esta modificación al trazado del límite del acuífero, el volumen de extracción era de 704 hm³/año censados.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo definido. La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

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

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 de una unidad hidrogeológica:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento en la unidad hidrogeológica}$$

Para el planteamiento del balance de aguas subterránea se consideró el periodo 1987-2004, y una superficie de 1,849 km² que corresponde a la zona donde se tiene información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos.

7.1 Entradas

La recarga total (R) al acuífero Valle de Mexicali está integrada básicamente por las entradas subterráneas (Eh), la recarga vertical por lluvia (Rv), la recarga inducida (Ri) y la infiltración a lo largo del cauce del río Colorado (Rr).

7.2 Recarga natural (Rn)

Esta recarga está constituida por la infiltración de una parte del agua precipitada en el área del valle, las infiltraciones a lo largo del cauce del río Colorado y la recarga por flujo horizontal subterráneo.

Recarga vertical por lluvia

La recarga vertical por lluvia en el área de balance, de 1,849 km², se calculó considerando una lámina de precipitación media anual de 83 mm y un coeficiente de infiltración de 3%. Por lo que la recarga vertical por lluvia es igual a **4.6 hm³/año**.

Recarga por infiltración del Río Colorado

La recarga vertical que se produce por efecto de la infiltración a lo largo del cauce del Río Colorado, se calculó a partir de la diferencia que existe entre el escurrimiento medido en el Río Colorado en la Estación hidrométrica localizada en la frontera internacional norte con los Estados Unidos de América y en la estación hidrométrica M.C. Rodríguez, localizada 39.4 km aguas debajo de la línea divisoria terrestre Internacional sur. La información hidrométrica fue tomada del Boletín Hidrometeorológico No. 24 CILA, 2001 para el período 1935-2001.

La diferencia entre el volumen de entrada y salida en este tramo del Río Colorado fue de 1516 hm³/año. De este volumen se estima que el 90 % se deriva para su utilización en el Distrito de Riego y/o se pierde por evapotranspiración.

De esta forma, de manera conservadora, se considera que el 10 % restante recarga por infiltración al acuífero. Por lo tanto el valor de este componente es de **152.6 hm³/año**.

7.2.1 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

El acuífero Valle de Mexicali recibe recarga por flujo subterráneo en la porción norte, procedente de Estados Unidos de América, (a través del canal Todo Americano) y del acuífero Valle de San Luis Río Colorado, tal como se aprecia en la figura 5 de curvas de igual elevación del nivel estático para el año 2004.

Con base en esta configuración se seleccionaron celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero, de acuerdo con la siguiente expresión:

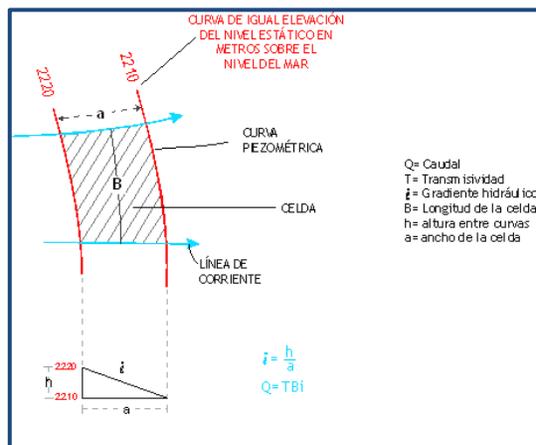
$$Q = B * i * T$$

Donde

B: Ancho (m) de la celda de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h_2 - h_1 / L$); h y L son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman la celda de flujo.

T: Transmisividad (m^2/s) en la celda de flujo



La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de las celdas establecidas. En la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos de entradas subterráneas en cada celda y el total de **166.0 hm³/año**.

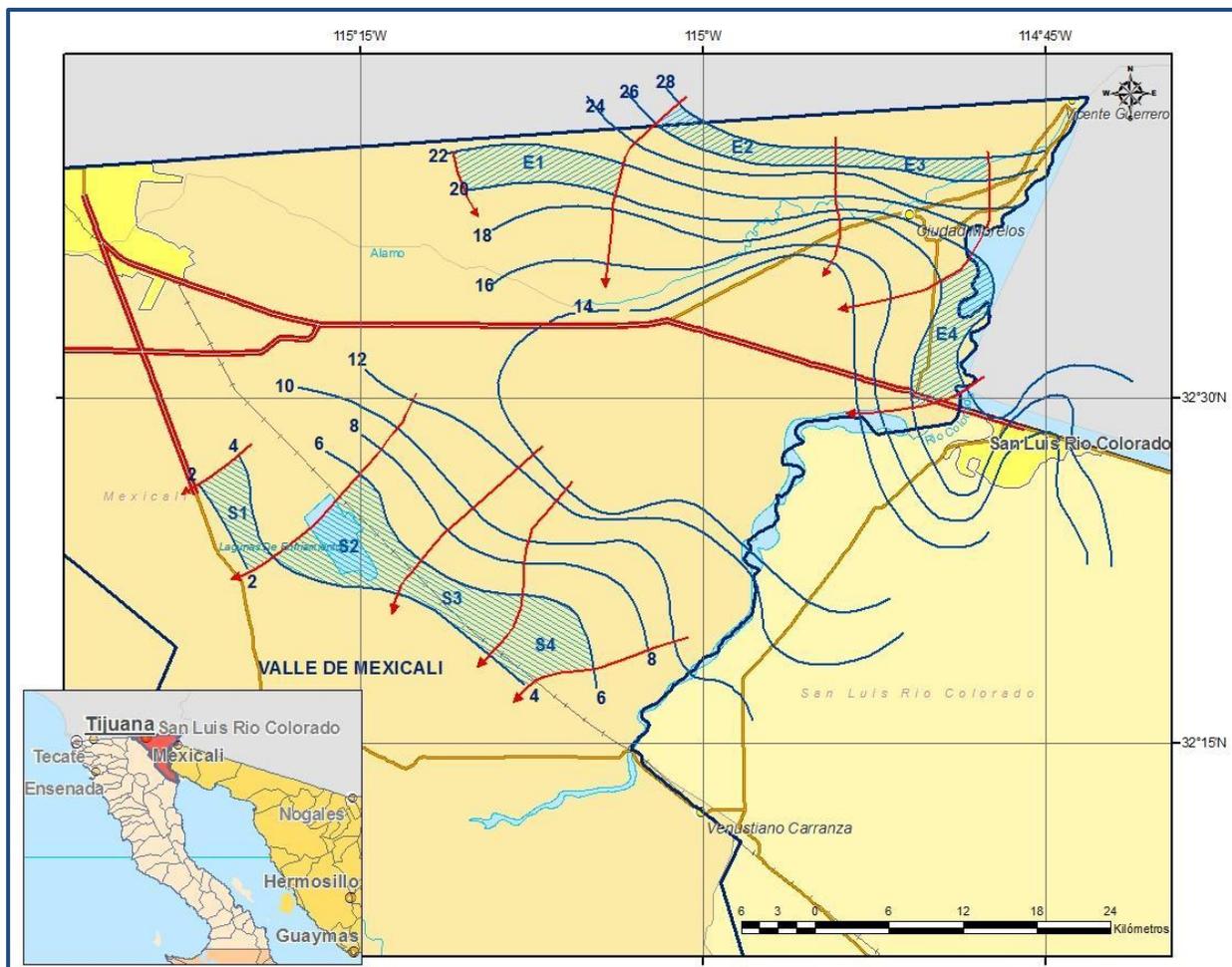


Figura 6. Configuración de elevación del NE y celdas de flujo (2004)

Tabla 2. Entradas subterráneas por flujo horizontal en el acuífero Valle de Mexicali

CELDA	Longitud (m)	Ancho (m)	Delta h (m)	Gradiente	Transmisividad m ² /s*	Caudal (m ³ /s)	Entradas (hm ³ /año)
E1	9700	3000	2	0.00066667	0.0775	0.5	15.6
E2	14130	1800	2	0.00111111	0.0775	1.2	38.3
E3	10500	1300	2	0.00153846	0.1500	2.4	76.0
E4	11550	3000	2	0.00066667	0.1500	1.2	36.1
Total de entradas subterráneas							166.0

Los valores de T utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas fueron tomados del Reporte Técnico GAS/SEMG/2005/01. En la porción noroeste del acuífero la transmisividad es de 0.0775 m²/s, y se incrementa hacia el noreste hacia el cauce del río Colorado, donde es de 0.15 m²/s.

7.2.2 Recarga inducida (Ri)

La recarga inducida se produce a partir de retornos de riego y pérdidas de la red de agua potable. El volumen utilizado para uso agrícola es de 588 hm³/año y para uso potable de 13 hm³/año. Se consideró un coeficiente de infiltración por concepto de retornos de riego de 0.33 y para las pérdidas en las redes de distribución de agua potable de 0.25. Los coeficientes de infiltración utilizados son altos debido a la alta permeabilidad de los materiales geológicos que conforman el acuífero. La recarga inducida se estima en **197.3 hm³/año**.

7.3 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), evapotranspiración (ETR), y salidas subterráneas (Sh).

7.3.1 Evapotranspiración (ETR)

El fenómeno de evapotranspiración ocurre en la porción norte y centro del acuífero Valle de Mexicali, en un área de 1519.1 km², donde el nivel de saturación se encuentra a profundidades menores a 10 m, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración. Debido a los valores bajos de precipitación en la zona de estudio, no pueden aplicarse los métodos empíricos de Turc, y Coutagne para calcular que la lámina de evapotranspiración real. Para la estimación de esta variable se tomaron en cuenta fracciones de la evaporación potencial medida, como se muestra en la tabla 3.

De la configuración de profundidad al NE mostrada en la figura No. 3, se consideraron las curvas menores e iguales a 10 m, se calculó el área entre ellas y se tomó el valor promedio entre curvas. Por ejemplo entre las curvas de 2 y 4 m, el valor promedio considerado fue 3 m.

El resultado de multiplicar el valor promedio por el área entre las curvas, se ponderó de acuerdo a un porcentaje de la evaporación potencial dependiendo de la profundidad. Las mismas consideraciones se hicieron para cada área comprendida entre dos curvas de profundidad menor a 10 m. Al final se obtiene la suma de los volúmenes de evapotranspiración.

El resultado de este proceso se presenta en la tabla 3, en la que se muestra que el valor de la evapotranspiración real calculado es de **11.0 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de la Evapotranspiración real

Profundidad al NE (m)	Profundidad promedio (m)	Área (km ²)	Porcentaje %	Evaporación Potencial (m)	Evapotranspiración (hm ³ /a)
0 a 2	1	60.1	1.0	2.316	1.4
2	2	13.7	0.5	2.316	0.2
2 a 4	3	508.4	0.4	2.316	4.7
4 a 6	5	377.8	0.3	2.316	2.6
6 a 8	7	368.7	0.2	2.316	1.7
8 a 10	9	190.4	0.1	2.316	0.4
Evapotranspiración total					11.0

7.3.2 Bombeo (B)

La extracción de agua subterránea en el área de acuerdo con la estimación más reciente es de **602.0 hm³/año**. Este volumen se emplea principalmente para uso agrícola.

7.3.3 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas que ocurren hacia la porción suroeste del área de balance fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático y celdas de flujo presentadas en la figura 6. La transmisividad en las celdas de flujo de salida corresponde a la más baja reportada en la zona de estudio debido al cambio en la granulometría del acuífero, de acuerdo con lo señalado en el Reporte Técnico GAS/SEMG/2005/01.

El valor de las salidas subterráneas, calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas, es de **2.5 hm³/año**, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Salidas subterráneas por flujo horizontal

Celda	Longitud (m)	Ancho (m)	Delta h (m)	Gradiente	Transmisividad (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)	(hm ³ /año)
C5	7825	2340	2	0.00085	0.005	0.0334	1.0
C6	6880	7000	2	0.00028	0.005	0.0098	0.3
C7	6450	2900	2	0.00069	0.005	0.0222	0.7
C8	9700	6600	2	0.00030	0.005	0.01469	0.5
Total de salidas subterráneas							2.5

7.4 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$)

Para la determinación de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero registrada durante el intervalo de tiempo 1987-1999, con base en la cual se realizó la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático mostrada en la figura 5 determinando la variación del almacenamiento con la siguiente expresión:

$$\Delta V(S) = S * A * h$$

Donde:

$\Delta V(S)$: Cambio de almacenamiento en el período analizado

S: Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

A: Área entre curvas de igual evolución del nivel estático

h: Valor medio de la variación piezométrica en el período

El valor del coeficiente de almacenamiento fue $S=0.3$, debido a la granulometría del acuífero y los valores obtenidos mediante la interpretación de pruebas de bombeo. En la tabla No. 5 se muestra el cálculo por áreas de evolución.

Para el período mencionado el cambio de almacenamiento fue de -1140.4 hm^3 que corresponde a un cambio de almacenamiento anual de **$-95.0 \text{ hm}^3/\text{año}$** .

Tabla 5 Cambio de almacenamiento del acuífero Valle de Mexicali

Evolución (m)	Área (km ²)	S	Cambio de almacenamiento hm ³ /a
-6.5	1.42	0.3	-2.8
-5.5	38.58	0.3	-63.7
-4.5	109.6	0.3	-148.0
-3.5	196.6	0.3	-206.4
-2.5	171.2	0.3	-128.4
-2	293.0	0.3	-175.8
-1.5	823.6	0.3	-370.6
-0.5	298.3	0.3	-44.7
0	210.1	0.3	0
Evolución en el período (hm³)			-1140.4
Evolución media anual (hm³/a)			-95.0

En la tabla 6 se presenta el resumen del balance del acuífero Valle de Mexicali.

Tabla 6. Resumen del balance de aguas subterráneas del acuífero Valle de Mexicali

Entradas (hm ³ /año)		Salidas (hm ³ /año)	
Infiltración del Río	152.6	Evapotranspiración	11.0
Recarga vertical	4.6	Bombeo	602.0
Recarga inducida	197.3	Salida Subterránea	2.5
Entrada subterránea	166.0	Cambio de almacenamiento	-95.0
Total de entradas	520.5	Total de salidas	520.5

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:

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

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 **520.5 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

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 el caso del acuífero se consideró la salida subterránea como la descarga natural comprometida, igual a $DNC = 2.5 \text{ hm}^3$ 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 **950,044,272 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - DNC - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 520.5 - 2.5 - 950.044272 \\ \text{DMA} &= -432.044272 \text{ hm}^3/\text{año}. \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **432,044,272 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2004. Reporte técnico No. GAS/SEMG/2005/01. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Exploración y Monitoreo.