



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO REAL DEL CASTILLO (0248), 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. FISIOGRAFÍA.....	5
2.1 Provincia fisiográfica.....	5
2.2 Clima.....	6
2.3 Hidrografía.....	6
3. GEOLOGÍA.....	7
4. HIDROGEOLOGÍA.....	10
4.1 Comportamiento hidráulico.....	10
4.1.1 Profundidad al nivel estático.....	10
4.1.2 Evolución del nivel estático.....	10
4.2 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	11
5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	11
6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	11
6.1 Ecuación general de balance.....	13
6.2 Entradas horizontales por flujo subterráneo.....	14
6.2.1 Cálculo de entradas por flujo subterráneo (Eh).....	16
6.2.2 Infiltración por lluvia (Ip).....	16
6.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh).....	17
6.2.4 Variación del almacenamiento subterráneo.....	18
6.3 Salidas.....	19
6.3.1 Extracción por bombeo (B).....	19
6.3.2 Ecuación de balance aplicada.....	19
6.3.3 Infiltración por riego (Ir).....	20
6.3.4 Salidas por evapotranspiración (Evt).....	20
7. DISPONIBILIDAD.....	22
7.1 Recarga total media anual (R).....	23
7.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	23
7.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	23
7.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	24

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 Real del Castillo, definido con la clave 0248 por la Comisión Nacional del Agua, cubre una superficie de 1,008 km². Limita al norte con los acuíferos Guadalupe y Las Palmas; al Este con Laguna Salada, al oeste con Ensenada y al sur con Ojos Negros. El área del acuífero se ubica aproximadamente a 45.0 km al oeste de la Ciudad de Ensenada (figura 1).

La principal vía de acceso se realiza por la carretera No. 4, Ensenada-San Felipe y el resto de la zona se comunica por caminos de terracería transitables durante todo el año, excepto cuando se presentan ciclos de lluvias extraordinarios.



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

ACUIFERO 0248 REAL DEL CASTILLO						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	116	22	4.4	31	59	27.9
2	116	21	417	32	1	33.2
3	116	14	52.9	32	5	29.9
4	116	12	19.3	32	5	30.5
5	116	4	46.0	32	9	45.5
6	115	59	5.6	32	9	7.0
7	115	53	9.1	32	9	19.4
8	115	54	57.1	31	57	15.6
9	116	4	2.5	31	57	30.3
10	116	6	58.2	31	59	12
11	116	10	34.7	31	56	55.3
12	116	14	12.2	31	56	43.6
13	116	15	25.1	31	57	9.1
14	116	17	19	31	57	0.8
15	116	21	45.5	31	55	55.2
1	116	22	4.4	31	59	27.9

1.2 Situación administrativa del acuífero

Por considerar la conservación de los acuíferos de Baja California, como de interés público, se decretaron zonas de veda por tiempo indefinido para alumbramiento de aguas del subsuelo:

El 26 de febrero de 1962 se decretó la zona de veda del Río Guadalupe, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de marzo de 1962, que comprende los valles de Ojos Negros, Guadalupe y La Misión.

El 22 de abril de 1965 se decretó la zona de veda para todo el Estado de Baja California, derogando el Decreto anterior; siendo su publicación en el Diario Oficial de la Federación el 15 de mayo de 1965.

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

2. FISIOGRAFÍA

2.1 Provincia fisiográfica

La cuenca hidrográfica del Valle Real del Castillo, está integrada en Subprovincia Fisiográfica identificada como Sierra de Juárez-San Pedro Mártir, correspondiente a la Provincia Regional conocida como Sierra Cristalina de Baja California (Manuel Alvarez Jr.); y de acuerdo a los rasgos estructurales, topográficos y características geológicas de las diferentes unidades de roca expuestas en el área, presenta un drenaje predominantemente subparalelo, con dirección de noreste-suroeste, al llegar a la influencia de la zona acuífera cambia de rumbo sensiblemente al sureste-noroeste y en la parte media del valle continúa con la misma dirección en forma franca hacia la cuenca vecina. El área de estudio está formada por una red de escurrimientos superficiales, se originan en la porción noreste de la cuenca, integrada por los arroyos El Barbón, Los Barrancos, El Ranchito y El Amargoso que entran al valle y constituyen el Arroyo El Barbón, drena la parte sur del valle y a dos kilómetros aproximadamente del cierre de la superficie acuífera se incorpora el Arroyo Jacalitos al cauce principal.

El principal escurrimiento de la cuenca es el Arroyo El Barbón, se origina en la Laguna de Juárez (Laguna Hanson), aporta entradas al sistema acuífero durante los ciclos de lluvias; en conjunto la red hidrográfica de la cuenca cuenta con una superficie de 1,008.0 km², de los cuales 39.600 km² corresponden a la superficie acuífera. En el área de estudio se observan cuatro rasgos geomorfológicos bien definidos por sus características geológicas.

El primer rasgo se ubica al noreste representado por la Sierra de Juárez, con elevaciones de 1,000 a 1,820 msnm, constituida predominantemente por rocas ígneas intrusivas identificadas como granodioritas y tonalitas; por rocas metamórficas integradas por esquistos, plutónicas y metamórficas mezcladas y una unidad determinada como secuencia Paleozoica; por remanentes de depósitos lacustres, cuyo espacio está ocupado por la Laguna Hanson. Esta unidad es la más accidentada de la cuenca, principalmente las zonas ocupadas por la unidad de rocas metamórficas.

El segundo rasgo ocupa las inmediaciones de la Sierra de Juárez presenta una topografía menos abrupta, está formada por rocas metamórficas, líticamente corresponden a esquistos, gneis, pizarra y plutónicas; así como por rocas metamórficas mezcladas y por rocas ígneas intrusivas, corresponden a tonalitas y remanentes aislados de granodiorita.

Al oeste del valle se ubica la tercera expresión fisiográfica marcada por la falla normal de Tres Hermanos deprimida hacia el área de análisis, formada por rocas metamórficas determinadas como gneiss y esquistos, presenta una topografía accidentada; también afloran en menor proporción rocas ígneas intrusivas cuyas características litológicas se agrupan como granodiorita y gabro. El cuarto y último rasgo, lo constituyen las partes planas del Valle Real del Castillo, en el cual se encuentra alojado el acuífero, cubierto por depósitos sedimentarios aluviales integrado por gravas gruesas, arenas de diferente granulometría, gravillas, arcillas y limos y por materiales de origen fluvial.

2.2 Clima

La zona en general se caracteriza por un clima seco estepario, semicálido con inviernos frescos, la temperatura media anual en la cuenca es de 13° C, con una mínima de 8° C y máxima de 23° C, la precipitación media anual es de 349 mm

2.3 Hidrografía

El área de estudio presenta una orientación de este-oeste, con una amplitud media de 4.875 kilómetros por 10.0 km de longitud, hacia la porción Oriental tiene como límite El Cerro Las Flores y varios afloramientos impermeables constituidos por rocas ígneas; al oeste del valle se ubican las sierras que separan las cuencas de Ensenada y Ojos Negros, integrada por rocas metamórficas de origen ígneo con posible permeabilidad secundaria; al Sur se identifica por suelo residual provocado por la meteorización de rocas ígneas, por el Cerro de Doña Eulalia cercano al Poblado de Ojos Negros que sirve de control hidráulico del acuífero y por afloramientos rocosos que separan las cuencas de Maneadero y Ojos Negros; en la porción norte del valle se ubica el Cerro del Talco, constituido por rocas metamórficas, funciona como una barrera impermeable entre los acuíferos Real del Castillo y Ojos Negros, sirve de control para que el flujo subterráneo del área de estudio no fluya en forma permanente al acuífero vecino. Únicamente comparten la recarga que aporta el Arroyo el Barbón y pequeños escurrimientos que drenan al oeste del valle y salen en el flanco occidental del Cerro del Talco.

De acuerdo con las características tectónicas de formación del valle, está constituido por depósitos sedimentarios no consolidados integrados por gravas, arenas de diferente granulometría, limos y arcillas, que cubren una antigua depresión estructural.

El basamento del acuífero está integrado por rocas ígneas intrusivas y metamórficas de condición impermeable.

3. GEOLOGÍA

En Baja California, afloran secuencias de formaciones rocosas, cuyas edades corresponden desde el Paleoceno hasta el Reciente, identificadas de acuerdo a las diferentes unidades litoestratigráficas que se diferencian por medio de tres cinturones preterciarios, se encuentran expuestos a lo largo de la porción norte de la Península, presentando características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciadas. Dichos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por cuerpos volcánicos y depósitos sedimentarios del Terciario y Cuaternario (figura 2).

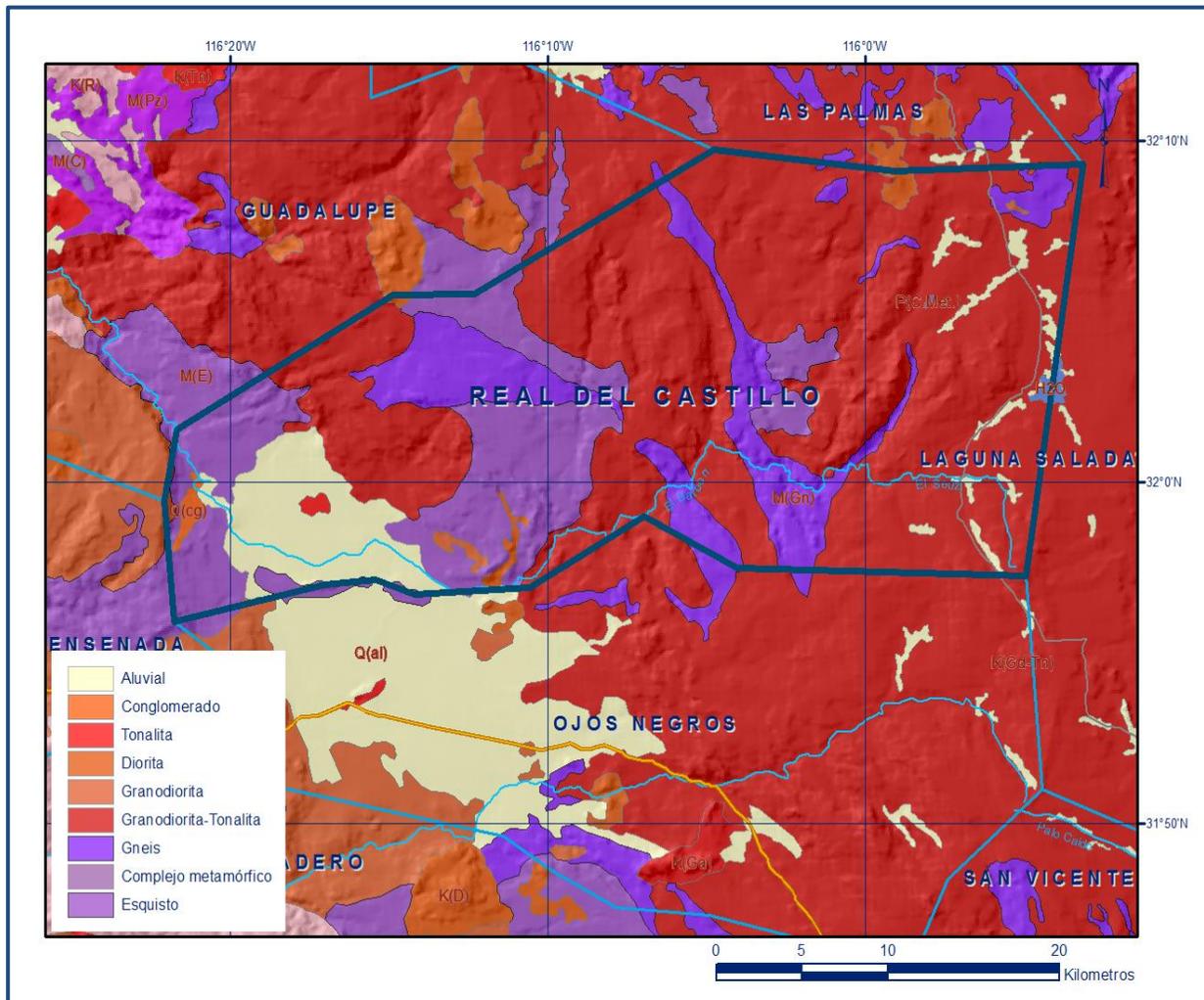


Figura 2. Geología general del acuífero

En la porción occidental de Baja California se observa el Primer Cinturón, constituido por una secuencia de depósitos sedimentarios de origen marino y continental de edad Cretácico Superior, se presentan poco consolidados y sin fuertes perturbaciones tectónicas.

Esta secuencia sedimentaria fue denominada por BEAL, 1948, como Formación Rosario, (Grupo Rosario); está constituida por estratos sub-horizontales de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados desarrollados en un ambiente mixto, varían desde continentales hasta de plataforma y talud, con línea de costa fluctuante. La secuencia de este cinturón cubre en discordancia angular a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario, a depósitos sedimentarios de origen continentales y marinos del Terciario y Cuaternario.

Al este del cinturón anterior, se ubica el Segundo Cinturón, constituido por rocas volcánicas, volcanoclásticas y sedimentarias de edad predominantemente del Cretácico Inferior. La secuencia superior es más extensa, fue denominada por SANTILLÁN y BARRERA en 1939, como Formación Alisitos, representada principalmente por rocas piroclásticas y lávicas de composición dácítico-andesítica, por cuerpos masivos de caliza arrecifal y por rocas clásticas de origen volcánicas.

La formación Alisitos cubre en algunas localidades discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad Triásico y Jurásico; se encuentran afalladas, deformadas, parcialmente metamorfizadas y afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos de naturaleza ácida del Cretácico, subyace discordantemente a la Formación Rosario.

El Tercer Cinturón se localiza en el borde oriental de la porción norte de la Península de Baja California, integrado por rocas ígneas intrusivas, varía de tonalita a granodiorita y granito, forma parte de los batolitos mesozoicos y rocas metamórficas originadas por metamorfismo regional de origen sedimentario, presentan diversas facies. El Cenozoico se caracterizó por la acumulación de gruesos espesores de depósitos sedimentarios continentales, por el desarrollo de sedimentos marinos, sobre todo en el borde Occidental de la Península y una importante actividad volcánica que cubrió una porción de los cinturones mesozoicos anteriores.

Durante el Paleoceno y Eoceno, se acumularon depósitos sedimentarios de ambiente cercano a la costa; estos depósitos tuvieron su origen en las porciones orientales emergidas.

Los sedimentos fluviales y eólicos que se encuentran expuestos a la altura del Paralelo 31°, se encuentran coronando a las emisiones lávicas del Plioceno y Mioceno, en la parte Sur del estado se acumularon depósitos fluviales, aluviales, eólicos y lacustres.

En el área de estudio, se identifican parte de las características litoestratigráficas anteriormente descritas de manera general. En el caso particular que nos ocupa, en la Cuenca del Valle Ojos Negros se observan dos rasgos geomorfológicos bien definidos, que a continuación se describen:

- El Primer rasgo, corresponde la porción nororiental de la cuenca, se observan afloramientos de rocas ígneas intrusivas predominantemente, constituidas por tonalitas y granodioritas con fracturamiento moderado y un intemperismo somero de edad Cretácica; por rocas metamórficas correspondientes a gneis y esquistos, se presentan en forma masiva con fracturamiento moderado a intenso con un grado de metamorfismo regional y con intemperismo somero de edad Jurásico; así mismo se observan afloramientos aislados de diorita de edad Cretácico Superior. Al sur, oeste y norte del valle afloran rocas metamórficas constituidas por Gneis principalmente y esquistos, con intenso fracturamiento de edad Jurásico y por rocas ígneas intrusivas identificadas como granodioritas y tonalitas del Cretácico; también se observan pequeños remanentes de gabro.
- El segundo rasgo corresponde al Valle de Ojos Negros, delimitado por las curvas de nivel de 685 a 750 msnm integrado por material aluvial y fluvial, producto de la meteorización de rocas pre-existentes y transportadas al valle principalmente por el Arroyo El Barbón, estos depósitos están constituidos por gravas, arenas de diferente granulometría, limos y arcillas, altamente permeables que integran el acuífero. También se observan depósitos de talud, piamonte y pequeños afloramientos aislados de rocas metamórficas e ígneas intrusivas.

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1 Comportamiento hidráulico

4.1.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad del nivel estático varía de 2.0 a 15.0 m en el valle.

La profundidad promedio ha variado dependiendo de la recarga y extracción en 1975, la profundidad media del valle era de 6.31 m y para 1976 sufrió un descenso anual de 8.04, debido a la poca recarga presentada.

De 1981 a 1984 el acuífero sufrió una recuperación como producto de las precipitaciones extraordinarias, reportando una profundidad media de 3.0 m. De 1984 a 1989 el acuífero sufrió un descenso medio anual de 0.3 m, lo que representa un período de sobreexplotación.

Siendo el un valle intermontano la elevación del nivel estático varía de 650 a 675 m sobre el nivel del mar.

4.1.2 Evolución del nivel estático

La evolución del nivel estático en el período de 1984-1989 fue negativa, habiendo extraído un volumen de 9.0 hm³/anuales de los cuales 3.0 hm³ anuales fueron extraídos con cargo al volumen almacenado, lo que representa un efecto de sobreexplotación. Lo anterior es grave considerando que el espesor medio saturado del acuífero es de 15 m y el volumen total almacenado es de 42 hm³, lo que implica que el acuífero no es capaz de soportar períodos largos de sobreexplotación.

La extracción de agua subterránea se determinó basándose en la información obtenida durante el recorrido de campo para cuantificar las superficies de riego, tipo de cultivo, tiempo de operación de la obra, registro hidrométrico subterráneo y aplicación de lámina de riego para cada cultivo; así mismo, se obtuvo información relativa a características constructivas de cada pozo activo ubicado dentro del área de análisis.

La información anterior, dio como resultado una extracción media anual de 8,505,922 m³ que corresponden a la extracción total.

4.2 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La calidad química del agua subterránea con relación a la cantidad de sólidos totales disueltos (STD), varía de 400 a 1,000 partes por millón (ppm), por lo que puede considerarse de buena calidad. Tomando en cuenta las condiciones geohidrológicas, se determinó que el acuífero presenta un riesgo de alto a extremo a la contaminación por lo que es muy vulnerable.

Actualmente se presenta un riesgo a la contaminación como producto de la aplicación sin control de agroquímicos en la actividad agrícola, además de las descargas de sustancias que se utilizan en la actividad minera para el beneficio de minerales, situación que debe ser regulada por el uso de sales derivadas de arsénico.

5. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

En febrero de 1999, se llevó a cabo la actualización del censo de aprovechamientos para la extracción de aguas subterráneas, se reportaron un total de 116 obras, de las cuales 77 corresponden a pozos profundos y 39 pozos a cielo abierto. Del total de obras censadas, 71 se encontraron activas, 54 se determinaron como pozos y 17 norias.

6. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea, es la aplicación del principio de conservación de la masa de una cierta región, definida por sus condiciones de retorno. En esa región de volúmenes conocidos y durante un cierto periodo en el que se realiza el balance, la definición de entradas y salidas debe ser igual al cambio de volúmenes de aguas subterráneas almacenadas en el acuífero.

El acuífero corresponde a la clasificación de tipo libre e intermontano, con características geológicas de buena permeabilidad, principalmente en la zona central del valle, constituida por depósitos sedimentarios heterogéneos, predominantemente granulares en una porción del área de análisis y sus contornos, tanto laterales como verticales integrado por rocas ígneas intrusivas y metamórficas impermeables.

La diferencia entre entradas y salidas en el sistema acuífero es igual al cambio de almacenamiento de un volumen considerado. En su forma más simple la ecuación de balance para un intervalo de tiempo determinado utilizando las literales mencionadas se expresaría de la siguiente forma:

$$E - S = \Delta V(s)$$

Donde:

E.- Corresponde a las entradas

S.- Representa las salidas

$\Delta V(s)$.- Cambio en el volumen almacenado

La variación del almacenamiento $\Delta V(s)$, constituye un volumen de agua que el acuífero toma o cede de su almacenamiento en un plazo determinado, su cálculo requiere contar con valores que correspondan a la posición inicial y final de los niveles estáticos correspondientes a los años comparados para conocer su evolución, así como el valor del coeficiente de almacenamiento del sistema acuífero. Por lo que el cambio de almacenamiento sería:

$$\Delta V(s) = A(Ah)S$$

Donde:

A.- Representa el área considerada del acuífero

Ah.- Variación de la carga hidráulica en el periodo considerado

S.- Coeficiente de almacenamiento

Los diferentes términos involucrados en la ecuación de balance, se exponen a continuación:

Literales de entrada

Ip.- Infiltración por lluvia

Ic.- Infiltración por cauces que alimentan al acuífero

Ica.- Infiltración procedente de cuerpos de agua superficial

Eh.- Entradas subterráneas horizontales

Esv.- Entradas subterráneas verticales. (Acuíferos subyacentes y/o suprayacentes)

Ir.- Infiltración en áreas de riego

Ia.- Infiltración por obras de recarga artificial

Literales de salida

Dc.- Aportación a corrientes superficiales

Dm.- Descargas por manantial

Sh.- Salidas subterráneas superficiales

Sv.- Salidas subterráneas verticales (Acuíferos subyacentes y/o suprayacentes)

Ev.- Evaporación en áreas con niveles freáticos someros

Tr.- Transpiración por freatofitas o cobertura vegetal

B.- Extracción mediante captaciones de aguas del subsuelo por bombeo

En su forma más simple, la ecuación de balance para un periodo de tiempo determinado utilizando las literales antes mencionadas se expresaría de la forma siguiente:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio en el volumen almacenado}$$

Las entradas están integradas por:

$$\text{Recarga natural} + \text{Recarga inducida}$$

Por su parte las salidas serían:

$$\text{Descarga natural} + \text{Descarga inducida (Bombeo)}$$

Entonces:

$$\text{Entradas} = I_p + I_c + I_{ca} + E_h + E_{sv} + I_r + I_a$$

$$\text{Salidas} = D_m + D_c + S_h + S_v + E_v + T_r + B$$

6.1 Ecuación general de balance

De las ecuaciones anteriores se obtiene la siguiente ecuación general de balance:

$$I_p + I_c + I_{ca} + E_h + E_{sv} + I_r + I_a - (D_m + D_c + S_h + S_v + E_v + T_r + B) = \pm \Delta V(s)$$

Las variables que no intervienen como entradas al sistema acuífero Real del Castillo son: **Ica, Esv y Ia**; las variables de salida que no participan en el balance son: **Dm, Dc y Sv**; por lo que la Ecuación de Balance de Agua Subterránea se reduce a las siguientes variables:

$$I_p + I_c + E_h + I_r - (S_h + E_v + T_r + B) = \pm \Delta V(s)$$

Es común que la evaporación (**Ev**) y transpiración (**Tr**) se manejen como un solo término denominado Evapotranspiración (**Evt**). En el área de estudio este fenómeno se presenta en una superficie de 11.860 km² con profundidades de niveles freáticos menores de 3.0 metros.

Así mismo se determinaron los valores horizontales de descarga de agua subterránea hacia la cuenca vecina, aún cuando deben ser poco significativos debido al espesor reducido de depósitos aluviales, pero es un hecho que estas salidas se incrementan en los ciclos de lluvias extraordinarias aportadas predominantemente por el Arroyo El Barbón y por los arroyos que convergen al área de análisis, principalmente en las porciones este y noreste; excepto el aporte del arroyo Jacalitos ubicado en la porción Noreste del valle, con una superficie de 93.000 km², descarga prácticamente a la salida del área de análisis.

Tomando en consideración lo anterior, las salidas de mayor importancia que ocurren en el acuífero son producto de las extracciones por bombeo y por escurrimientos superficiales que han sido mayores que la recarga, debido al poco espesor de los depósitos sedimentarios permeables de alto rendimiento.

Por lo tanto, la ecuación aplicable al balance del agua subterránea se reduce a la siguiente expresión:

$$I_p + I_c + E_h + I_r - (S_h + E_v + B) = \pm \Delta V(s)$$

6.2 Entradas horizontales por flujo subterráneo

Para cuantificar el caudal de agua subterránea que participa como entradas por flujo subterráneo horizontal al sistema acuífero para un periodo considerado, se realiza aplicando la **Ley de Darcy** a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isoclinas equipotenciales y dos líneas de corrientes definida por la configuración de elevación del nivel freático para el periodo analizado.

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

$$Q = BT_i + Bkbi$$

$$T = K(B)$$

Por lo tanto:

$$K = \frac{T}{b}(S) * (86,400 - \text{seg})$$

Donde:

B.- Ancho de la celda

b.- Espesor saturado

T.- Transmisividad. Definida como el producto de **K(b)**, de la expresión para el gasto que circula por la celda, obtenemos:

$$Q = BTi = BbK$$

La expresión de Q para n celdas de la red de flujo es la suma de los caudales que circulan por la misma:

$$Q = \sum_{j=1}^n B_j b_j K_j I_{j=1}$$

Las magnitudes de **I** y **B**, se midieron directamente del plano de configuraciones de elevaciones del nivel freático, cuando se trazó la red de flujo.

Para cuantificar el caudal de flujo que circula a través de la sección seleccionada, se consideró el concepto de transmisividad T, representativa para cada una de las secciones participantes en forma de promedios: determinados en los años de 1974, mediante pruebas de bombeo realizadas por la Compañía Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A. En el planteamiento del cálculo se consideró una sección ubicada en el Sureste del Valle Real del Castillo, se localiza sobre el área de influencia que ejerce el Arroyo El Barbón, escurrimiento principal que recarga por flujo subterráneo horizontal al sistema acuífero

Las elevaciones del nivel freático están delimitadas sobre las isolíneas de 675.0 msnm a 679.0 msnm, en las cuales se consideró una transmisividad obtenida en 3 pruebas de bombeo, correspondientes a etapas de abatimientos situados en la porción central y al noroeste con un valor de $T = 0.0179 \text{ m}^2/\text{día}$ para calcular las entradas principalmente, y a la salida del área de análisis, cuyo valor medio de transmisividad es de $T = 0.0130 \text{ m}^2/\text{día}$.

El cálculo de volúmenes de entrada de agua subterránea se presenta en el cuadro siguiente:

6.2.1 Cálculo de entradas por flujo subterráneo (Eh)

Celda	B (m)	K (m)	b (m)	l	Q (m ³ /año)
Eh	1,200	17.17	90	0.004	7, 417.440

Entradas por Flujo Subterráneo = **7'417,440 m³/año**

El volumen de agua incorporado al acuífero se incrementa durante los ciclos de lluvia, en época de estiaje los escurrimientos superficiales solamente se manifiestan en forma de pequeñas lagunas, localizadas en el extremo oeste del Cerro del Talco, zona de comunicación del acuífero Ojos Negros con el área del presente estudio.

Es un hecho que las precipitaciones pluviales ocurridas en la cuenca, han participado desde hace más de 25 años aportando entradas de agua por flujos subterráneos al sistema acuífero. Las elevaciones del nivel freático en la sección seleccionada no han variado hasta la fecha de manera significativa.

De estas observaciones se puede concluir, que después de cada ciclo de lluvia principalmente cuando estas son de ocurrencia extraordinaria, como ha sucedido prácticamente desde 1978 a la fecha, las avenidas que aporta el Arroyo El Barbón han sido capaces de sustituir el agua extraída del acuífero por bombeo de los aprovechamientos que suministran agua para uso agrícola.

Con los excedentes se incrementan las salidas de agua por flujo subterráneo horizontal y por los escurrimientos superficiales que descargan a la cuenca vecina.

6.2.2 Infiltración por lluvia (Ip)

La infiltración por lluvia participa en la recarga que alimenta al sistema acuífero, se presenta en una superficie de 39.600 km² correspondiente al área de análisis.

Para determinar el valor medio de lluvia se analizaron los datos históricos de precipitación pluvial ocurridas en el área, considerada para el estudio la estación climatológica establecida en la cuenca vecina, identificada con el nombre de Ojos Negros, No. 25, se determinó un promedio de 236.0 mm.

El cálculo del valor de infiltración por lluvia se define como:

$$I_p = (V_p)K$$

Donde:

Vp.- Volumen precipitado por lluvia en m³

K.- Coeficiente de proporcionalidad

El volumen de lluvia se obtiene de multiplicar la superficie del área de análisis (**39.600 km²**) por la lámina precipitada, con lo que se obtiene un volumen de **9,345,600 m³/año**, producto de la precipitación ocurrida en el área de análisis multiplicada por el coeficiente de proporcionalidad, resultando un volumen de entrada al acuífero, identificada como **Ip**.

Infiltración por lluvia = 9,345.600 X 0.26 = 2,429,856 m³

6.2.3 Salidas horizontales por flujo subterráneo (Sh)

El flujo por salidas horizontales se calculó de acuerdo a las consideraciones expuestas en el tema anterior, en el siguiente cuadro se presentan los resultados:

Salidas subterráneas horizontales:

Celda	B (m)	K (m)	b (m)	I	Q (m ³ /año)
Sh ₁	900	28.08	40	0.000544	549.91872

Caudal anual = 549,918 m³

Debido al poco espesor de materiales permeables en la sección de salida; así mismo, tomando en consideración las características físicas y geológicas tanto a profundidad como lateralmente, esta sección está constituida por unidades de rocas metamórficas e ígneas intrusivas de carácter impermeables, por lo que las descargas tienen aparentemente un espacio reducido. Los mayores volúmenes de salida se presentan por escurrimientos superficiales, estas se incrementan sustancialmente cuando ocurren ciclos de lluvias extraordinarias, registradas prácticamente de 1978 a la fecha.

Existen datos históricos de estos eventos ocurridos en el área de estudio en los años de 1978, 1980, 1982 y 1983. Es un hecho que las precipitaciones pluviales registradas en este periodo rebasó en más del 280% a los ciclos de lluvias normales que se han presentado en esta región.

6.2.4 Variación del almacenamiento subterráneo

El abatimiento o ascenso del nivel freático comparado a un periodo determinado, origina variación en el almacenamiento de agua en el subsuelo del sistema acuífero, por lo que en el presente estudio se cuantificó para dar solución a la ecuación de balance. El cambio de almacenamiento se determinó a partir de la configuración del plano de evolución de niveles freáticos. La expresión matemática aplicada para esta finalidad es la siguiente:

$$V = S \sum_{j=1}^{n_a} a_i (hi)$$

Donde:

V.- Volumen drenado en el periodo considerado en m³

S.- Coeficiente de Almacenamiento

a_i.- Incremento de áreas en m²

hi. Variación del nivel freático en m

n_a.- Número de elementos en que se divide el área de balance

El análisis de la información del nivel freático corresponde al periodo de noviembre 1974-febrero 1999, en el que se determinó una variación de volumen en los sedimentos saturados de +56'143,255 m³ en el espacio de 24.3 años y la respuesta para un año fue de +2'310,422 m³ y una recuperación media del nivel freático de + 0.34 m.

De igual forma se comparó la variación de niveles en los años junio 1989-febrero 1999, se observa una recuperación de 8'454,950 m³ en un espacio de 9.8 años, reflejándose en el ascenso del nivel freático con un valor de 0.18 m y un volumen incrementado al subsuelo de 862,750 m³/año.

Cabe hacer notar, que la comparación de niveles en el segundo periodo analizado correspondiente al mes de junio, los riegos aplicados a las superficies agrícolas son intensos, por lo que se justifica la poca respuesta de ascenso de los niveles freáticos a nivel regional.

6.3 Salidas

6.3.1 Extracción por bombeo (B)

La extracción de agua subterránea se determinó basándose en la información obtenida durante el recorrido de campo para cuantificar las superficies de riego, tipo de cultivo, tiempo de operación de la obra, registro hidrométrico subterráneo y aplicación de lámina de riego para cada cultivo; así mismo, se obtuvo información relativa a características constructivas de cada pozo activo ubicado dentro del área de análisis.

La información anterior, dio como resultado una extracción media anual de **8,505,922 m³** que corresponden a la extracción total.

6.3.2 Ecuación de balance aplicada

La solución de la ecuación de balance, consistió en calcular los términos desconocidos correspondientes a las entradas subterráneas horizontales (**Eh**), recarga vertical (**Rv = Ip + Ir**) é infiltración por cauces (**Ic**), salidas horizontales (**Sh**) y evapotranspiración (**Evt = Ev + Tr**).

Al contar con una ecuación de cuatro incógnitas se tomaron en consideración las siguientes variables:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de Almacenamiento}$$

$$Eh + Rv - (Sh + Evt + B) = \Delta V(s)$$

De la información obtenida del estudio realizado por la Compañía Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A. en 1974, se consideraron algunos de los parámetros desarrollados por dicha compañía

Términos de la ecuación de balance

Periodo	Entradas Horiz. (Mm ³ /año)	Recarga Vert. (Mm ³ /año)	Salidas Horiz. (Mm ³ /año)	Salidas Evapot. (Mm ³ /año)	Extrac. Bombeo (Mm ³ /año)	Cambio Vol. Almac. (Mm ³ /año)
1973 - 1974	6.000				6.5	-0.500
Jun 89-Feb 99	7.417440		0.549918		8.505922	-1.638400

Los términos **Ip, Ir y Evt**, son las incógnitas, las dos primeras variables corresponden a la recarga vertical (**Rv**), **Ip** está representada por el promedio anual de la precipitación pluvial registrada en las Estaciones Climatológicas ubicadas dentro o cercanas al área acuífera, **Ir** es el agua que se usa en el riego de superficies agrícolas.

En el siguiente tema se desglosa el cálculo de la variable **Ir**.

6.3.3 Infiltración por riego (Ir)

Para determinar la infiltración en la superficie de riego, al volumen total de extracción mediante el sistema por bombeo le fue restado el volumen de agua destinado para el uso doméstico y abrevadero; por lo cual fue considerado exclusivamente el volumen destinado para riego agrícola que es de **6,999,600 m³**.

El cálculo de volumen infiltrado se define como:

$$Ir = (Vr)K$$

Donde:

Vr.- Volumen de riego

K.- Coeficiente de Proporcionalidad

Para conocer el volumen total infiltrado se agruparon las dos variables **Ip + Ir**, determinado como recarga vertical (**Rv**) y el resultado se multiplicó por un coeficiente de proporcionalidad (**K = 0.26**).

La ecuación final queda:

$$Rv = (Ip + Ir)K$$

Donde:

$$Rv = (9,345,600 + 6,999,600) 0.26$$

$$Rv = (16,345,200) 0.26$$

$$Rv = 4,249,522 \text{ m}^3 / \text{año}$$

6.3.4 Salidas por evapotranspiración (Evt)

Para definir las salidas por evaporación y transpiración en zonas cuyos niveles freáticos registran profundidades menores a 3.0 metros, se manejaron como un solo término denominado Evapotranspiración (**Evt**).

El procedimiento consiste en calcular la evapotranspiración media anual de la estación climatológica establecida en el área acuífera, para el presente balance se utilizaron dos estaciones Ojos Negros y Agua Caliente en las cuales se determinó un valor medio de 179.44 mm, lámina que se aplicó en una superficie de 11.860 km².

Los términos que constituyen esta ecuación son los siguientes:

$$\text{Evt} = (\text{Sc}) 0.179 \text{ m}$$

Donde:

Evt.- Evapotranspiración en mm

Sc.- Superficie considerada en m²

Evt.- (11.860 X 10⁶m²) 0.179 m

Evt = 2,122,940 m³.

Solución de la ecuación de balance

Determinados los valores de **Eh, Rv y Sh**, de los elementos de la ecuación de balance de agua subterránea del Valle Real del Castillo, correspondiente al periodo junio 1989-febrero 1999 y la reevaluación del cálculo de volúmenes del estudio anterior, se analizaron las dos ecuaciones, quedando de la siguiente forma:

Balance de Aguas Subterráneas

Periodo	Entradas Horiz. (Mm ³ /año)	Recarga Vert. (Mm ³ /año)	Salidas Horiz. (Mm ³ /año)	Salidas Evapot. (Mm ³ /año)	Extrac. Bombeo (Mm ³ /año)	Cambio Vol. Almac. (Mm ³ /año)
1973 - 1974	6.000				6.500	-0.500
Jun 89-Feb 99	7.417	4.250	0.550	2.123	8.506	+0.488

Considerando los resultados anteriores se puede presentar un balance medio anual de agua subterránea. En primer término, el volumen aportado por entradas horizontales **Eh**, con un valor de 7,417,440 m³; **Rv** corresponde a la recarga vertical obtenida en los 39.600 km² del área de análisis, estimándose un volumen de 4,249,752 m³, lo cual representa una recarga total de 11,667,192 m³/año.

El volumen total de extracción fue de 11,178,780 m³/año, obtenidos de la siguiente forma: por bombeo 8,505,922 m³, salidas horizontales 549,918 m³ y evapotranspiración de 2,122,940 m³.

Comparando los valores de **Eh + Rv**, con los de **Sh + Evt + B**, resulta un valor positivo de **+ 0.488X10⁶ m³/año**, lo cual demuestra que el acuífero Real del Castillo se encuentra en equilibrio dinámico. De acuerdo a lo anterior, se deberá tener cuidado con la autorización de incremento de volúmenes o construcción de nuevos aprovechamientos para uso agrícola, con la finalidad de no provocar descenso regional del nivel freático. En resumen, la Ecuación del Balance Hidráulico del sistema acuífero Real del Castillo, queda de la siguiente forma:

$$Eh + Rv - (Sh + Evt + B) = \pm \otimes V(s)$$

Eh Entradas Horizontales Mm³	Rv Recarga Vertical Mm³	Sh Salidas Horizontales Mm³	Evt Evapotranspiración Mm³	B Bombeo Mm³	⊗V(s) Cambio de Almacenamiento Mm³
7.417	4.250	0.550	2.123	8.506	+0.488

Tomando en consideración todas las literales que participan en el presente balance hidráulico del sistema acuífero Real del Castillo, la ecuación se desglosa con sus respectivos valores numéricos, queda de la siguiente forma:

$$Eh + Ip + Ir - (Sh + Evt + B) = \pm \otimes V(s)$$

$$7,417,400 + 2,429,856 + 1,819,896 - (549,918.72 + 2,122,940 + 8,505,922) = \pm \otimes V(s)$$

$$11,667,152 - (11,667,178) = \pm \otimes V(s)$$

$$\otimes V(s) = 488,372 \text{ m}^3/\text{año}$$

7. 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

7.1 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 **11.7 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

7.2 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, el volumen considerado como descarga natural comprometida es de **DNC = 0.0 hm³ anuales**.

7.3 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 (REPGA), 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 **10,630,667 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**.

7.4 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 11.7 - 0.0 - 10.630667 \\ \text{DMA} &= 1.069333 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **1,069,333 m³ anuales**.