



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO BALUARTE (2510), ESTADO DE
SINALOA**

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.....	7
3.1. Provincia fisiográfica.....	7
3.2. Clima.....	9
3.3. Hidrografía.....	10
3.4. Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1. Estratigrafía.....	13
4.2. Geología estructural.....	20
4.3. Geología del subsuelo.....	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1. Tipo de acuífero.....	24
5.2. Parámetros hidráulicos.....	24
5.3. Piezometría.....	24
5.4. Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	25
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	26
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	26
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	27
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....	28
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	29
7.1. Entradas.....	29
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	30
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	30
7.1.3. Recarga incidental (Ri).....	31
7.2. Salidas.....	32
7.2.1. Bombeo (B).....	32
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	32
7.2.3. Evapotranspiración (ETR).....	33
7.2.4. Descarga por manantiales (Dm).....	34
7.2.5. Flujo base (Dfb).....	35
7.3. Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	35
8. DISPONIBILIDAD.....	36
8.1. Recarga total media anual (R).....	36
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	37
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	38
9. BIBLIOGRAFÍA.....	39

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 Baluarte, definido con la clave 2510 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo suroriental sur del estado de Sinaloa, entre los paralelos 22°46'31" y 23°43'27" de latitud norte y 105°22'00" y 106°10'33" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 5,594km², que comprende también una porción de la zona serrana suroccidental del estado de Durango.

Limita al norte y oeste con el acuífero Río Presidio; al sur con los acuíferos Valle de Escuinapa y Laguna Agua Grande, al sureste con el acuífero Río Cañas, todos ellos pertenecientes al estado de Sinaloa, al este y sureste con Valle Acaponeta-Cañas, del

estado de Nayarit. En su extremo suroccidental, su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, el área que cubre el acuífero comprende casi la totalidad del municipio de Rosario, parcialmente Concordia y una muy pequeña superficie de Escuinapa, en el estado de Sinaloa. En el estado de Durango abarca parcialmente el municipio de Pueblo Nuevo, así como una pequeña área de San Dimas.

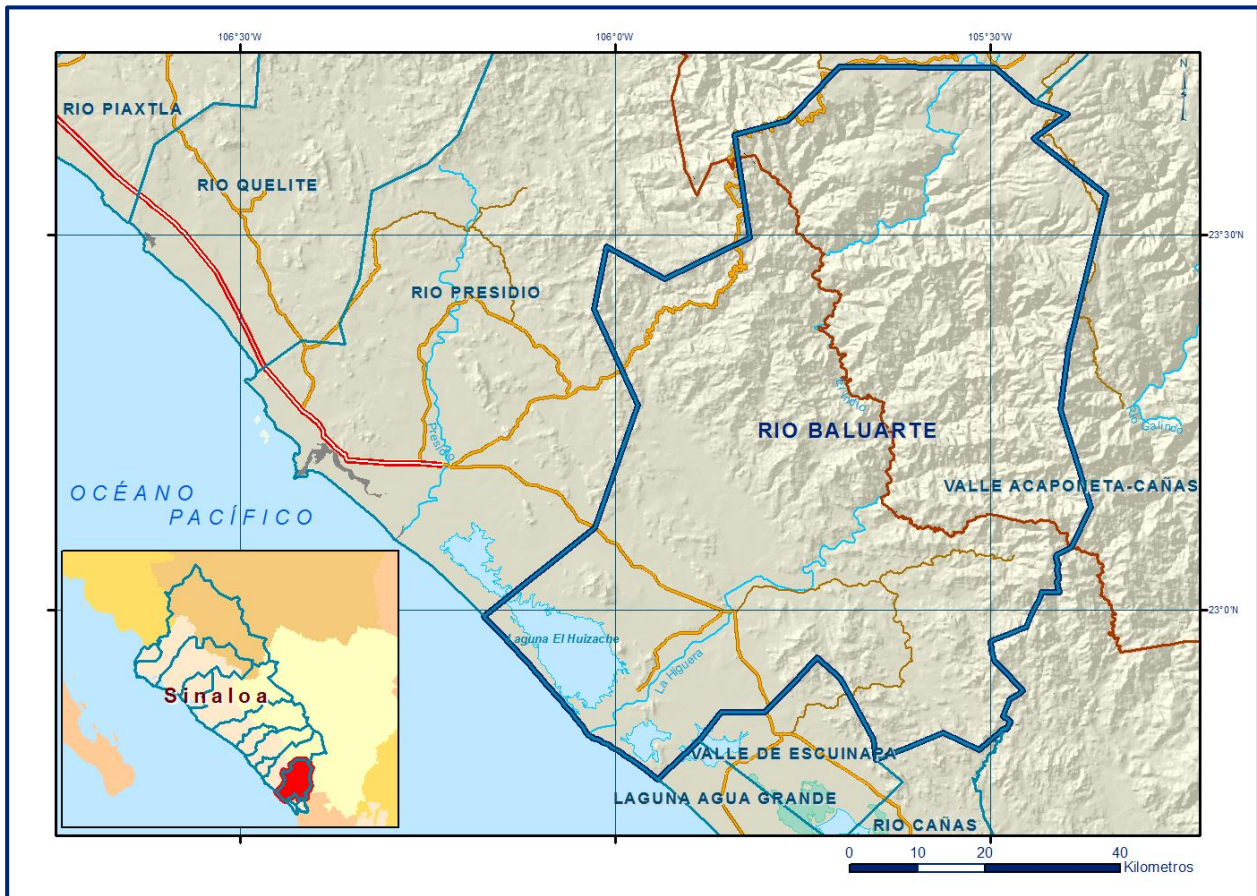


Figura 1. Localización del acuífero

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de la poligonal simplificada que delimitan al acuífero

ACUÍFERO 2510 RIO BALUARTE							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	105	29	11.4	22	50	20.9	
2	105	30	57.3	22	48	48.6	
3	105	33	52.0	22	50	12.1	
4	105	36	47.5	22	48	57.9	
5	105	39	12.9	22	48	1.7	
6	105	39	24.2	22	49	43.3	
7	105	42	3.3	22	54	33.9	
8	105	43	55.0	22	56	12.9	
9	105	46	6.0	22	53	50.0	
10	105	48	5.0	22	51	50.0	
11	105	51	35.0	22	51	50.0	
12	105	53	25.0	22	49	35.0	
13	105	56	40.7	22	46	29.9	
14	106	10	32.3	22	59	32.1	
15	106	1	42.6	23	6	37.1	
16	105	58	13.6	23	16	25.6	
17	106	1	46.5	23	24	3.8	
18	106	0	47.0	23	29	3.3	
19	105	56	7.3	23	26	28.1	
20	105	49	19.6	23	29	46.6	
21	105	50	30.0	23	38	2.7	
22	105	46	13.8	23	39	9.4	
23	105	42	10.0	23	43	27.3	
24	105	29	42.0	23	43	25.8	
25	105	26	30.6	23	40	42.5	
26	105	23	52.1	23	39	40.6	
27	105	26	34.8	23	37	43.0	
28	105	20	49.3	23	33	14.7	
29	105	23	48.4	23	20	59.8	
30	105	24	25.3	23	16	4.4	
31	105	21	59.5	23	8	15.4	
32	105	23	34.7	23	5	1.4	DEL 32 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	105	29	11.4	22	50	20.9	

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Pacífico Norte y al Consejo de Cuenca Ríos Presidio al San Pedro, instalado el 15 de junio de 2000. En el territorio completo que cubre el acuífero no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no

se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El uso principal del agua subterránea es el público-urbano. En el territorio del acuífero se localiza parte del Distrito de Riego 081 "Elota-Piactla". No se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). En la franja costera del acuífero se ubica el Santuario Playa El Verde Camacho, decretado el 16 de julio de 2002, el Área de Protección de Flora y Fauna Islas del Golfo de California, decretada el 7 de junio del 2000, y parte del sitio RAMSAR Laguna Huizache-Caimanero, considerado como tal desde el 2 de febrero de 2007

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que comprende el acuífero se han realizado estudios hidrogeológicos de evaluación, otros con fines de prospección minera y algunos de cobertura regional en acuíferos vecinos. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN LOS ARROYOS QUELITE, POZOLE Y PRESIDIO EN MAZATLÁN. ESTADO DE SINALOA. Realizado en 1981 por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., Consultores para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Entre sus actividades más relevantes destacan censo y piezometría, sondeos geofísicos, muestreo de agua para análisis fisicoquímicos y ejecución de 17 pruebas de bombeo. Plantea el balance de aguas subterráneas y calcula una recarga media anual de 97.5 hm³.

ESTUDIO DE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO Y CALIDAD DEL AGUA EN LOS ACUÍFEROS RÍO BALUARTE, VALLE DE ESCUINAPA, LAGUNA AGUA GRANDE Y RÍO CAÑAS, SINALOA. Realizado en 2008 por SABINFOSISTEM, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue establecer una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención

de información hidrogeológica-piezométrica de los acuíferos, mediante la ubicación, inspección y selección en campo de pozos de monitoreo, conocer la evolución y la condición de los niveles del agua subterránea.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LOS ACUÍFEROS DE LOS RÍOS PRESIDIO, BALUARTE, VALLE DE ESCUINAPA Y LAGUNA AGUA GRANDE EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 2013 por Proyectos, Estudios y Servicios en Ciencias e Ingeniería Agrícolas, S.A. de C.V. (PRESENCIA) para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte. El estudio tuvo como objetivo general conocer las condiciones de explotación del agua subterránea y el funcionamiento geohidrológico del acuífero, determinar su disponibilidad y que los resultados obtenidos sirvan de herramienta para su ordenamiento y proponer las políticas de explotación adecuadas. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, realización de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos, fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

INTEGRACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO JUSTIFICATIVO DE LOS ACUÍFEROS RÍO ELOTA CLAVE 2506, RÍO PIAXTLA CLAVE 2507, RÍO QUELITE CLAVE 2508, RÍO BALUARTE CLAVE 2510 Y LAGUNA AGUA GRANDE CLAVE 2512, EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 2014 para la Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA). Su objetivo general fue integrar los estudios técnicos que permitan determinar las causales de interés y utilidad públicos necesarios para la fundamentación y motivación que requiere la emisión del ordenamiento de los acuíferos. Adicionalmente incluyó actividades de campo como piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y toma de muestras de agua para análisis fisicoquímicos.

INFORMACIÓN PIEZOMÉTRICA DEL ACUÍFERO RÍO BALUARTE, SINALOA Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2019. Se utilizó la información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático.

Estos dos últimos trabajos y la información piezométrica actualizada al año 2016, recabada por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte de la CONAGUA, constituyen la

base para la elaboración de este documento, por lo que sus resultados y conclusiones se presentan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de Erwin Raisz (1959), modificada por Ordoñez (1964), el área que cubre casi la totalidad del acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica “Sierra Madre Occidental”, que se caracteriza por un conjunto de sierras con orientación NW-SE y E-W, que presentan una flexión al N-S. La porción costera pertenece a la Provincia Fisiográfica “Llanura Costera de Sinaloa”.

Por otro lado, según la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el acuífero se localiza en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental, Subprovincias Gran Meseta y Cañadas Duranguenses, Mesetas y Cañadas del Sur y Pie de la Sierra; y en la Provincia Llanura Costera del Pacífico, Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán.

La Sierra Madre Occidental (SMO) es una cadena montañosa que abarca todo el oeste mexicano y el extremo suroccidental de los Estados Unidos. En sus 1500 km de longitud recorre Arizona, parte de Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Nayarit y Jalisco, lugar donde se une al Eje Volcánico Transversal de México. Cubre 289,000 km² y ocupa la sexta parte del territorio mexicano. Su punto más alto es el Cerro Gordo ubicado en Durango, su ancho promedio es de 150 km, con alturas de hasta 3,000 msnm. Presenta una orientación NW-SE y comprende la porción oriental del estado de Sinaloa; es una extensa meseta formada por rocas volcánicas disectada por fallas normales y grabens, cuyo borde occidental se caracteriza por presentar una terminación abrupta con fallas normales que presentan grandes desplazamientos y zonas de barrancas profundas.

La Subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses comprende el extremo norte del acuífero; está formada por rocas ígneas extrusivas ácidas y formada principalmente por mesetas de gran superficie con cañadas y de sierras altas con cañones. Su principal rasgo son las grandes mesetas limitadas por abruptos y enormes acantilados. Las características especiales de esta subprovincia son su elevación sobre el nivel medio del mar y el gran número y extensión de sus hermosos y fértiles valles, separados uno de otros por altas barreras montañosas. La Subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur está formada por mesetas altas interrumpidas de manera abrupta

por profundos cañones y cañadas que son el resultado del tectonismo y de la erosión fluvial sobre los diversos tipos de rocas volcánicas y vulcanoclásticas que conforma la sierra.

Presenta superficies de meseta en promedio más altas que las del resto de la provincia, cañones paralelos y alternos a las superficies de meseta, interrumpidos en ocasiones por valles de laderas tendidas que, río abajo, vuelven a encañonarse; está drenada por corrientes fluviales que escurren hacia el sur y vierten sus aguas en el Río Grande de Santiago o desembocan en la Llanura Costera del Pacífico. La Subprovincia Pie de la Sierra se extiende como una franja angosta en el oeste de la SMO y tiene una orientación NW-SE. Se caracteriza por presentar sierras y lomeríos con litología similar a la de la subprovincia Mesetas y Cañadas del Sur, aunque mucho más heterogénea, ya que tiene unidades de granito, andesita, basalto y conglomerado; asimismo, las sierras son de altitud menor que las de dicha subprovincia, las mesetas son escasas, dominan los lomeríos bajos disectados, y los valles, algunos de ellos muy llanos; se trata de una región transicional entre la Sierra Madre Occidental y la Llanura Costera del Pacífico, pero presenta una afinidad genética y morfológica mucho mayor a la primera.

La Provincia Fisiográfica Llanura Costera de Sinaloa se caracteriza por ser una extensa llanura en forma de cuña, que comienza al sur, en Mazatlán, que se va haciendo más extensa al norte hasta alcanzar su ancho máximo en Los Mochis. Forma un plano inclinado hacia el suroeste que ocasiona que los ríos en ella tengan en su curso una dirección casi normal a la costa. Estos ríos son: Canoas, Rosario, Quelite, Piaxtla, Elota, San Lorenzo, Culiacán o Tamazula, Mocorito, Sinaloa y Fuerte. Presenta abanicos aluviales, antiguos valles fluvio-deltaicos, pequeñas colinas constituidas por rocas pre-deltaicas, deltas actuales, estuarios, complejos lagunares, cauces de ríos y arroyos, depósitos eólicos y marinos, las cuales pueden ser clasificadas como unidades fisiográficas en cuanto al ambiente de formación como: continentales, fluviales, mixtas o de transición, eólicas y marinas. La Subprovincia Llanura Costera de Mazatlán presenta las menores pendientes y está conformada por materiales de arrastre fluvial y de oleaje complejos, dominada por una llanura irregular con lomeríos bajos y muy modelados por la acción eólica y marina, con grandes llanuras de inundación, lagunas y pantanos, que conforman la interface marino-terrestre fluvial.

3.2. Clima

Con base en la clasificación climática de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1981 para las condiciones particulares de la República Mexicana, se afirma que los climas en la zona sur del estado de Sinaloa, están definidos por franjas paralelas a la planicie costera. Debido a la gran extensión territorial del acuífero y a la diversidad de altitudes que varía desde la zona costera hasta las mayores elevaciones de la Sierra Madre Occidental, de 2700 msnm, se presentan varios tipos de clima.

En la porción serrana del acuífero, cubriendo un 36 % de la superficie total del acuífero, se presenta el clima templado subhúmedo; en tanto que el 61% de la región centro y costera del acuífero se caracteriza por su clima cálido subhúmedo. En la porción topográfica más alta, abarcando el 2% del área total, el clima es semifrío subhúmedo. En una porción menor de la zona serrana, que representan 1% del área total del acuífero, se caracteriza por presentar clima frío.

En el clima cálido subhúmedo (Aw0) se registran precipitaciones de verano entre 1,000 y 2,000 mm anuales, temperatura media anual mayor a 22° °C, con regiones en donde superan los 26° C, y un cociente entre la precipitación y la temperatura menor a 43.2. El clima C(w2), templado subhúmedo presenta régimen de lluvias de verano y escasa precipitación el resto del año o de invierno; su temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C, precipitación del mes más seco mayor a 40 mm y el cociente precipitación/temperatura es mayor de 55.0. El clima tipo semifrío subhúmedo registra una temperatura media anual entre 5 y 12 °C, régimen de lluvias en verano, precipitación del mes más seco mayor a 40 mm y un cociente entre la precipitación anual y la temperatura media anual mayor a 55.

La región está expuesta a dos regímenes de precipitación: las lluvias de verano y las de invierno; las primeras son producidas por la temporada normal de lluvias y eventos hidroclimatológicos extremos, como los ciclones, los cuales se presentan con regularidad; generalmente estas lluvias se presentan en los meses de junio a octubre; las cuales suelen ser intensas y de corta duración, generando fuertes avenidas, que producen inundaciones en las partes bajas del valle. La segunda temporada de lluvias es invernal, producida por los frentes fríos que se presentan durante los meses de noviembre a enero, de menor intensidad que las de verano. Por otro lado, el período de estiaje, donde las precipitaciones son prácticamente nulas, ocurre de febrero a mayo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 13 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Otatitlán, Las Tortugas, Rosario, Potrerillos, Plomosas, Pánuco, Las Habitas, El Palmito (CFE), Concordia (CFE), El Salto, (DGE), Pueblo Nuevo, La Peña y La Ciudad (CFE) con un periodo de registro que comprende de 1951 a 2010. Con estos datos y utilizando el método de Polígonos de Thiessen, se determinaron valores de precipitación y temperatura media anual representativos de toda la **superficie del acuífero** de **1,1180.7 mm** y **21.0 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor de **1,510.1 mm anuales**.

Sin embargo, debido a la extensión del acuífero y la gran variabilidad de condiciones climáticas que se presentan por efecto de la topografía, para fines del balance y la estimación de las variables climatológicas en la **zona de explotación** del acuífero, se obtuvieron los valores medios anuales de temperatura, precipitación y evaporación potencial, a partir de los datos de las tres estaciones que tienen influencia en la porción baja de la cuenca: Las Tortugas y Rosario: **25.6°C, 906.70 mm y 1757.6 mm**, respectivamente.

3.3. Hidrografía

El acuífero Río Presidio se encuentra ubicado en su totalidad en la Región Hidrológica 11 “Presidio-San Pedro”, en su vertiente del Pacífico, Subregión Hidrológica Presidio, Baluarte y Cañas, cuenca del Río Presidio y porciones pequeñas de las cuencas Presa Lázaro Cárdenas y Río Piaxtla-Río Elota-Río Quelite. La superficie del acuífero se ubica dentro de 9 subcuencas hidrográficas principales: Río de Santiago, Arroyo El Jaral, Arroyo Arenales, Arroyo El Salto, Río Piaxtla, Río La Venta, Río Presidio, Mazatlán y Caimanera. Estas tres últimas subcuencas son las que desembocan al Océano Pacífico y en ellas se localiza la zona de explotación. En la zona costera se localiza la Laguna El Huizache, cuya mayor extensión se presenta en el acuífero vecino Río Baluarte.

En el territorio que cubre el acuífero se localizan corrientes superficiales de régimen intermitente, ríos perennes, lagunas y zonas inundables. Las principales corrientes superficiales son los ríos Presidio, San Diego y Santiago que tienen arroyos afluentes en ambos márgenes.

El Río Baluarte, es la corriente superficial perenne más importante. Se origina en la Sierra Madre Occidental, en territorio del estado de Durango, en una pequeña meseta cercana al poblado La Peña en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, a una

elevación de 2,600 m.s.n.m., siguiendo la dirección NE-SW a lo largo de 45 km con el nombre de Quebrada de Guadalupe, después de recibir las aportaciones de un pequeño afluente, El Zapote, cambia su curso a rumbo NW-SE y de nombre a Río Rosario o Baluarte, sirviendo a lo largo de 35 km de límite estatal entre Durango y Sinaloa. Ya en este último estado recibe las aportaciones de los ríos Matatán y Pánuco, sus principales afluentes.

En esta confluencia adopta un rumbo NE-SW, cruza poco después la carretera Guadalajara-Nogales y la población El Rosario, Sinaloa, para finalmente desembocar en el Océano Pacífico.

Su longitud aproximada es de 150 km hasta su desembocadura y drena una superficie de cuenca de 5,094 km². Sus dos afluentes importantes son el Río Matatán que tiene una longitud de 43 km y confluye a él aguas arriba de la ciudad El Rosario, y el Río Pánuco, con una longitud de desarrollo de 43 km, que confluye por la margen derecha en un punto situado a unos 10 km, aguas arriba de El Rosario.

3.4. Geomorfología

En la superficie que cubre el acuífero se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas: lomeríos, sierras, mesetas, lomeríos, llanuras deltaicas, valle, cañón, cauces fluviales, abanicos aluviales, lagunas litorales, valles deltaicos y estuarios, relacionadas con el origen y naturaleza de las rocas y depósitos que las conforman. Las mayores elevaciones topográficas conforman las sierras y mesetas constituidas por las rocas volcánicas ácidas de la Sierra Madre Occidental.

En la zona de transición con la sierra madre occidental, la planicie costera presenta una topografía de lomeríos aislados de más de 50 metros de altura, que disminuyen gradualmente a 10 m en promedio, hasta volverse semiplana, en dirección hacia la línea de costa. Los valles son estrechos en forma de "v" y las corrientes presentan gradientes altos que las ubica en una etapa juvenil.

Los abanicos aluviales se forman al pie de las sierras y están conformados por depósitos clásticos de granulometría variada. Los lomeríos se observan en la porción media de la cuenca, en el flanco occidental y están conformados por rocas volcánicas. El valle se localiza también en la porción media de la cuenca, pero en su extremo oriental; está constituido por sedimentos aluviales. La llanura deltaica está conformada por los sedimentos acarreados por el río Baluarte, presenta una morfología plana y

ligeramente inclinada hacia el mar. Presenta meandros abandonados que manifiestan los movimientos laterales del cauce del río.

Los valles deltaicos son depósitos en las márgenes del cauce del Río Baluarte, de forma plana, suave pendiente y sobre ellos se han desarrollado gran cantidad de meandros que se localizan en las partes topográficamente bajas e inundables. Los estuarios se localizan prácticamente en el litoral; en la desembocadura del Baluarte, en donde se ensanchan por las mareas y las crecientes del río, Junto con las lagunas litorales, representan rasgos fisiográficos típicos de todo el litoral del estado de Sinaloa. La región en la que se encuentra la zona de explotación presenta en una etapa geomorfológica de madurez tardía, mostrando una topografía suave y redondeada, producto de la erosión y del intemperismo.

4. GEOLOGÍA

El basamento de la región está dominado por una secuencia vulcanosedimentaria metamorfozada, conformada por pizarras, filitas, cuarcitas y esquistos con algunos horizontes lávicos intercalados. Estas rocas se han ubicado en el Paleozoico (?) por correlación y similitud litológica con la Formación San José de Gracia (Carrillo M., 1971) del norte de Sinaloa. Esta secuencia subyace discordantemente a las rocas del Cretácico Inferior-Superior. El Cretácico Inferior consta de rocas andesíticas y le sobryace en contacto concordante un paquete de rocas calcáreas arrecifales de estratificación masiva, que ha sido datada por su contenido fósil en el Albiano (Holguín, 1978); sin embargo, se ha observado que al norte del estado estos cuerpos calcáreos tienen un rango estratigráfico mayor que abarca hasta el Cenomaniano-Turoniano y ocasionalmente en el Maestrichtiano (Perkins, 1969) (figura 2).

El Paleoceno-Eoceno está representado por una secuencia de andesitas y tobas andesíticas, seguido por un periodo de erosión que originó el relleno de pequeñas cuencas continentales con conglomerado polimíctico de edad Eoceno-Oligoceno en donde los componentes derivan de las secuencias cretácicas y de los derrames andesíticos. El Oligoceno-Mioceno está caracterizado por rocas ignimbríticas y tobas riolíticas que cubren discordantemente al conglomerado polimíctico y a los derrames andesíticos.

Descansando sobre el paquete riolítico se tiene una secuencia vulcanoclástica constituida por una alternancia de areniscas y limolitas de la Formación San Ignacio (Fredrickson, G., 1974); donde sus constituyentes provienen de rocas volcánicas y de

material ignimbrítico. Por último, se tiene un conglomerado polimíctico constituido por clastos de las rocas preexistentes, que cubre parcialmente en discordancia a la secuencia vulcanoclástica y a las secuencias volcánicas descritas anteriormente. El Cuaternario está constituido por derrames basálticos, depósitos aluviales, lagunares y eólicos.

Las rocas intrusivas forman parte de gran Batolito de Sinaloa, cuyas edades obtenidas abarcan un rango de 100 a 27 Ma, aunque se han obtenido edades aisladas de 135 Ma y 18 Ma. Christopher, D.H., 1975, divide a los cuerpos intrusivos en dos grandes grupos: Intrusivos sintectónicos cuya edad es mayor de 85 Ma y fueron emplazados durante un periodo de compresión regional; intrusivos postectónicos, no foliados y con edades menores de 85 Ma. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques aplíticos y andesíticos, así como por pórfidos dioríticos y por cuerpos de composición ultrabásica, en los cuales es común la mineralización de cobre, cromo y níquel (Carta Geológico-Minera Mazatlán F13-1. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Precámbrico-Paleozoico al Holoceno y está constituida por rocas volcánicas e intrusivas, metamórficas y sedimentarias (figura 2). La sucesión de eventos magmáticos ocurridos se encuentra cubriendo, mediante una discordancia petrológica, a escasos afloramientos de rocas sedimentarias del Cretácico Inferior y Superior. El magmatismo inicia en el Oligoceno y continúa de manera interrumpida hasta el Holoceno.

Las rocas más antiguas que afloran en la región y que constituyen el basamento geológico, están formadas por esquistos y pizarras pertenecientes a la formación conocida como Complejo Sonobari; el cual se encuentra afectado por un intrusivo ácido de edad cretácica perteneciente al batolito que aflora en Sonora y Sinaloa, compuesto por granitos, granodioritas, monzonitas y tonalitas. Sobreyaciendo en forma discordante a estas rocas, descansa un paquete de calizas marinas con intercalaciones de margas y lutitas de edad Cretácico. El Terciario se encuentra representado por rocas volcánicas, vulcanoclásticas de composición que varía de ácida a básica y una unidad de tobas, areniscas y conglomerados estratificados y cementados con un buzamiento regional hacia el noroeste, denominados como Formación Báucarit, de origen continental.

El Cuaternario presenta depósitos de sedimentos clásticos de origen aluvial y fluvial, constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas, que se encuentran mezclados entre sí en diferentes porcentajes y en ocasiones en horizontes puros, que conforman diferentes unidades fisiográficas. Los depósitos sedimentarios están constituidos por conglomerados del Terciario, parcialmente cubiertos por materiales aluviales y depósitos fluviales del Cuaternario; rellenan toda la planicie y son muy heterogéneos en cuanto a su litología, grado de cementación y propiedades hidráulicas. Su espesor es mayor de 200 m en las porciones centrales de la planicie y se acuña en dirección de la sierra, así como hacia los cerros dispersos que se localizan en la región.

PRECÁMBRICO-PALEOZOICO

Complejo Sonobari

Unidad compuesta por gneises de muscovita y de biotita, intercalados con anfibolitas e intrusionados por diques de pegmatitas y migmatitas que presentan deformación y que se encuentran intrusionados entre sí.

PALEOZOICO METASEDIMENTARIO

Con este nombre se designa a una secuencia de rocas sedimentarias marinas del Paleozoico que presentan grados de bajo metamorfismo de la facies de esquistos verdes y de anfibolita. En general, la unidad se caracteriza por rocas esquistosas, pizarras, cuarcitas, calizas recristalizadas, pedernal, otras rocas arcillo-arenosas, así como esquistos y pizarras moteadas que indican metamorfismo de contacto, cuyos afloramientos muestran una morfología de lomeríos bajos y redondeados.

En su litología pueden distinguirse dos grupos diferentes de rocas: Las rocas metasedimentarias esquistosas, producto de un metamorfismo de bajo grado, cuya mineralogía indica una facies de anfibolita, en las que los esquistos más comunes son los de clorita y cuarzo, albita y muscovita o cuarzo-feldespáticos. El otro grupo corresponde a rocas metamórficas de contacto presentadas por esquistos y pizarras moteadas, producto de las aureolas del contacto con los intrusivos que las afectan. Representa, de manera general, un protolito constituido por una antigua secuencia arcillo-arenosa, algunas veces conglomerática, con intercalaciones de rocas carbonatadas, la cual fue afectada por metamorfismo regional y de contacto, plegada, fallada e intrusionada cuando menos en tres ocasiones.

CRETÁCICO

Está representado por las rocas intrusivas, principalmente graníticas y granodioríticas, que forman parte de gran Batolito de Sinaloa, cuyas edades obtenidas abarcan un rango de 100 a 27 Ma, aunque se han obtenido edades aisladas de 135 y 18 Ma. Los cuerpos intrusivos están afectados por generaciones de diques aplíticos y andesíticos, así como por pórfidos dioríticos y por cuerpos de composición ultrabásica, en los cuales es común la mineralización de cobre, cromo y níquel.

TERCIARIO INFERIOR

La litología característica de esta unidad inferior son las lavas andesíticas con textura porfídica y afanítica que presentan color violeta, tobas, aglomerados, sedimentos híbridos, andesitas basálticas y en algunas localidades rocas intermedias y ácidas interestratificadas, las cuales se encuentran generalmente alteradas y oxidadas.

Sus afloramientos se presentan en forma de colinas bajas y onduladas, intensamente falladas y fracturadas como producto de la intensa deformación y alteración causada por intrusivos, en discordancia angular con las rocas metamórficas y las calizas del paleozoico, y cubiertas por rocas de composición riolítica.

También se presenta una secuencia de rocas volcánicas conformada por andesitas, tobas andesíticas, areniscas tobáceas oxidadas, con escasos afloramientos de dacitas, basaltos, y en menor proporción derrames riolíticos, aglomerados, brechas y materiales piroclásticos de composición intermedia. Asociados frecuentemente a esta unidad y estratigráficamente abajo, se encuentran algunos vitrificados de color negro. Su morfología característica es la de bloques escarpados con inclinaciones en diversas direcciones y en algunas localidades es común encontrarla muy erosionada. Las rocas de este tipo se correlacionan con las del Complejo Volcánico Inferior (McDowell y Keizer, 1977) que constituyen la base de la Sierra Madre Occidental

La unidad de rocas ácidas está representada por derrames riolíticos, riolitas, riodacitas, tobas riolíticas y riodacíticas y areniscas conglomeráticas que presentan estructuras vesiculares y amidgaloides y como rasgo característico las estructuras de flujo que forman una secuencia de planos verticales o inclinados en ángulos fuertes. Con frecuencia estos planos de flujo se observan formando pliegues primarios.

En el extremo nororiental del acuífero, en el estado de Durango, las rocas del Complejo Volcánico Inferior están representadas de la base a la cima por la unidad de andesitas-

brechas volcánicas andesíticas, con intercalaciones de ceniza y piroclastos, de edad Paleoceno-Eoceno determinada por datación radiométrica. La secuencia se presenta afectada por un intrusivo de composición granítica-granodiorítica.

TERCIARIO MEDIO

Está representado por una secuencia de rocas de origen vulcanoclásticas constituida por arenisca, limo, areniscas tobáceas, aglomerado, tobas, lavas ácidas y tobas líticas, que en su mayor parte presentan un color rojizo a verdoso. Se presentan como estratos tabulares de espesores que varían de 3 a 30 cm, como intercalaciones conglomeráticas en espesores variables de unos centímetros a varios metros; pueden reconocerse estructuras primarias como grietas de lodo, gotas de lluvia, horadaciones, estratificación cruzada, estratificación gradual, así como estratos limotílicos y lutíticos.

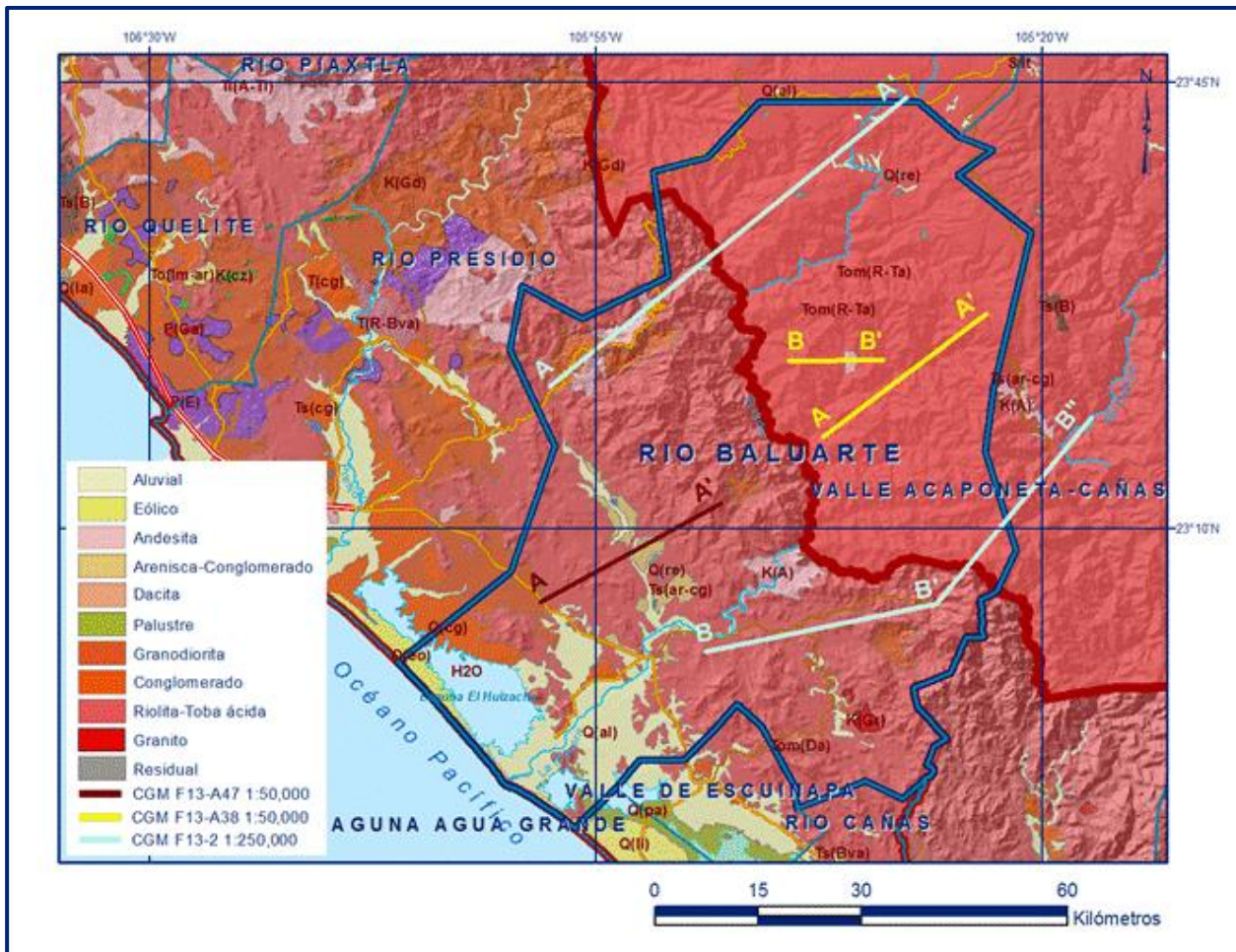


Figura 2. Geología general del acuífero

TERCIARIO SUPERIOR

En su base se presentan rocas volcánicas y piroclásticas de composición riolítica más jóvenes, entre las que destacan las ignimbritas. La riolita, es la litología volcánica más extendida en el área, en la que se observa la estructura fluidal que consiste en una masa oscura de grano fino entre lentes y trazas de color rosa y ocasionalmente fenocristales de feldespato. Su morfología es muy distintiva, ya que forma grandes mesetas inclinadas generalmente hacia el poniente.

Dataciones radiométricas de rocas de esta unidad indican una edad de 13 Ma por lo que probablemente representan el intervalo comprendido entre la parte superior del Terciario Medio y la inferior del Terciario Superior. Estas rocas se correlacionan con las del Supergrupo Volcánico Superior (McDowell y Keizer, 1977). En la porción del acuífero que se localiza en el estado de Durango, las rocas del Supergrupo Volcánico Superior están conformadas en su base por una brecha volcánica riolítica y hacia la cima por tobas riolíticas, con intercalaciones de tobas piroclásticas y ceniza de lapilli, cuya edad se asignó al Oligoceno mediante dataciones radiométricas.

La unidad está afectada por cuerpos intrusivos hipabisales de composición diorítica y riolítica de edad Oligoceno y domos riolíticos exógenos de edad Oligoceno Tardío, ambas edades fueron determinadas por medio de sus relaciones de campo. Sobreyace discordantemente a las secuencias volcánicas anteriores la unidad de tobas riolíticas-ignimbritas, que forma parte del Grupo El Salto-Espinazo, de edad Terciario Mioceno determinada por medio de dataciones radiométricas. Estas rocas se encuentran afectadas por una unidad de forma cómica, de composición riolítica, conocida como Las Adjuntas, cuya edad es Mioceno Temprano, según datación radiométrica de K-Ar de 27.7 ± 0.3 Ma

El Terciario clástico está conformado por un espesor considerable de limos, areniscas tobáceas y conglomerados, con horizontes delgados de piroclastos y en ocasiones con lavas. Las rocas de esta unidad descansan en discordancia sobre rocas más antiguas. Frecuentemente su contacto es tectónico, en otros descansa en contacto erosional sobre rocas de la unidad intrusiva ácida. La edad de las rocas de la base del Terciario y las de la unidad terciaria inferior volcánica, o unidad terciaria ácida no varían mucho, lo más probable es que representen una transición entre la mayoría de las unidades terciarias, tanto vertical como lateralmente.

Conglomerado Polimíctico

Secuencia conglomerática que rellena las depresiones de los valles y presenta intercalaciones de basaltos.

El conglomerado está constituido por clastos de roca mal clasificados de variada composición y tamaño, de 1 a 20 cm. La composición de los clastos está en función del paquete rocoso que lo delimita, se aprecia cierta gradación y alternancia en la secuencia de depósito que gradada de finos a gruesos, aunque en la mayoría de los casos se manifiesta como depósito caótico. Está compuesto por fragmentos líticos mal clasificados, de color gris claro-amarillento a rojizo, la forma de estos clastos es angulosa y subangulosa de tamaño variable, cementados por una matriz arenarcillosa, areno-tobácea y carbonatada de pigmentación rojiza.

Considerando su posible correlación con la Formación Báucarit, se puede considerar que la secuencia pertenece a una facies clástica que comprende conglomerados polimícticos y areniscas, asociados a la formación de un abanico aluvial. Por otro lado, su origen también se asocia al proceso distensivo que dio origen a las depresiones y por consiguiente a los clásticos que rellenan estas fosas.

Formación Metates

Nombre fue propuesto por Córdoba (1963) para referirse a los derrames de basalto con olivino que sobreyacen en discordancia erosional con la Formación Río Chico. El autor sitúa la localidad tipo en el km 990 de la carretera Durango-Mazatlán, en las cercanías del poblado Metates y le atribuye una edad correspondiente al Paleógeno Superior. Se encuentra en discordancia con las rocas riolíticas, en forma de pequeños afloramientos de basalto de escasa potencia que presentan una coloración gris oscura, intemperizando a gris rojizo. Aflora al noreste del acuífero.

En los trabajos consultados, algunos autores mencionan que estos basaltos son correlacionables con los de la Formación Guadiana

CUATERNARIO

Formación Guadiana

Albritton (1958) asigna el nombre de Formación Guadiana a los derrames de basaltos que afloran a 25 km al este de la ciudad de Durango, en el poblado Saltito de La Constanca. Está constituida por derrames de brecha basáltica; basalto de color oscuro en superficie fresca que intemperiza a café oscuro, de textura afanítica con

estructura vesicular, con presencia de olivino de color amarillo verdoso; su localidad tipo se encuentra en la población de Cárdenas, localizada al SW de la ciudad de Durango, en donde se encuentra constituida exclusivamente por gravas con lentes arenosos, con un espesor que varía de 6 a 12 m. Por otra parte, es sobreyacida por sedimentos aluviales recientes, distinguiéndose de éstos por su textura gravillenta y arenosa de color café claro parcialmente cementados por caliche, así como por la presencia de huesos y dientes de vertebrados de edad Pleistoceno.

Por la similitud litológica y posición estratigráfica, los basaltos del área se correlacionan con los de la localidad tipo, que se ubican en el Pleistoceno. Según Lyons (1975) la emisión de los basaltos ocurrió después del segundo colapso de la Caldera Chupaderos. Representan la última actividad volcánica del Neógeno y cubren grandes extensiones de terreno; por su color y forma son fáciles de identificar en campo. Se presentan en forma de derrames intercalados en el Conglomerado Polimíctico; volcanes y conos cineríticos.

Los basaltos son de color gris oscuro a negro de textura afanítica que varía a fanerítica, puede ser compacta o vesicular dependiendo de su génesis, contiene plagioclasa sódica con cristales de olivino y ferromagnesianos. Afloran fuera del acuífero, en el límite de los acuíferos Río Presidio, Valle del Guadiana y Valle Acaponeta-Cañas.

DEPOSITOS SEDIMENTARIOS

Los sedimentos de esta edad son los que cubren la mayor superficie de la porción media y llanura costera del acuífero. Están conformados por diferentes unidades.

Depósitos conglomeráticos de talud, pie de monte y abanicos aluviales que se localizan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas; están constituidos por peñascos, bloques y guijarros de composición variable. Las gravas y conglomerados que constituyen a los abanicos aluviales y depósitos de talud son fragmentos angulosos y redondeados, de 20 cm hasta 1.0 m de diámetro, de composición volcánica intrusiva contenidos en una matriz arenosa o tobácea y ocasionalmente bien cementadas. Por su origen presentan una mala clasificación lo que ocasiona que su permeabilidad sea variable, dependiendo del contenido arcilloso y grado de compactación. Morfológicamente, se presentan como lomeríos de suave relieve.

Las llanuras deltáicas se conforman de conglomerados, sedimentos arenosos y arenolimosos que presentan una clasificación pobre y estratificación cruzada, en ocasiones

con abundante materia orgánica. Las arenas y arcillas de origen fluvial, son depositadas por los ríos y arroyos al divagar en la planicie costera antes de desembocar en el mar. Forman parte de la llanura costera y presentan un relieve suave caracterizado por lomeríos remanentes de la superficie preexistente. Incluye también las acumulaciones arenosas de origen eólico, que han quedado fuera de la fuente de aporte de sedimento y que han sido fijadas por la vegetación, formando dunas estabilizadas, o bien por la acción de las aguas circulantes.

Depósitos aluviales se ubican en la porción media del valle y consisten de gravas y arenas de variada granulometría, así como limos y arcillas de origen aluvio-fluvial. Estos depósitos aluviales junto con los de la llanura deltaica constituyen el acuífero principal, de permeabilidad variable cuyo espesor total no se ha determinado.

Los depósitos arenosos de origen marino que indican el carácter progradante de la línea de costa (bermas o terrazas) fueron formados por la acción del oleaje y mareas que aportan los sedimentos hacia la alta playa y paulatinamente quedan fuera del alcance de la erosión marina. En general, están constituidos por arena de grano medio a fino, con dimensiones medias de 0.5 a 12 mm, con presencia de conchas fracturadas de pelecípodos en cantidades variables.

Sedimentos limosos y arcillosos constituyen lodos negros ricos en materia orgánica que se localizan en las zonas bajas, próximas a la desembocadura de los ríos y lagunas y están sujetos a la acción de las mareas y al flujo del río.

Los sedimentos arenosos y arena limosos se localizan en albardones, las gravas en el lecho de los canales fluviales y ocasionalmente en la llanura de inundación. Por último, en amplias áreas bajas sin relieve, localizadas tierra adentro de las lagunas y barreras litorales inundables por la acción de las mareas, se presentan sedimentos finos, arenas de grano medio a fino y limos que conforman llanuras de inter-marea; son identificadas en su límite superior por un pequeño escarpe de erosión causado por la acción erosiva de la marea ascendente y oleaje por viento.

4.2. Geología estructural

Estructuralmente la región está afectada principalmente por fallamientos de orientación NW-SE y NE-SW. Este último puede ser el más antiguo y tener su origen en la componente compresiva de la Orogenia Laramide. Al cese de los esfuerzos laramídicos la región entra en un periodo de relajamiento por procesos isostáticos y se genera una serie de fallamientos en sentido ortogonal al esfuerzo, que dieron origen

al fallamiento de rumbo NW-SE. Es muy probable que este fallamiento se haya reactivado durante la apertura del Golfo de México. El fallamiento NE-SE constituye una serie de fosas y pilares tectónicos escalonados que se observa en la región de San Ignacio y en general en el límite de la planicie costera y la Sierra Madre Occidental. Al oriente de San Pablo este fallamiento tiene desplazamientos laterales, predominantemente dextrales. El sistema estructural de dirección NE-SW, provoca desplazamientos de bloques e interrupción de estructuras.

Existe un tercer fallamiento de orientación ENE-WSW, que tiene una edad comprendida entre 30 y 10 Ma que se considera anterior a la formación de las sierras y valles (Zoback et al., 1981). Una posible explicación es que puede ser la continuidad en continente de las fallas transformantes. Las estructuras anulares observadas en la interpretación de imágenes de satélite son generalmente abiertas, con diámetros entre 1 y 12 km, posiblemente relacionadas a calderas o intrusiones dómicas y a conos volcánicos producto del último evento magmático en la región (Carta Geológico-Minera Mazatlán F13-1. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

La historia tectónica de la Sierra Madre Occidental (SMO), en el contexto geológico de México, ha sido interpretada por diferentes autores por medio de diferentes modelos de evolución geodinámica tratando de explicar su origen; uno de los más aceptados es el que se relaciona inicialmente como resultado de la subducción de la Placa Farallón bajo la corteza continental de México y posteriormente una reacción de la corteza a los movimientos de subducción, involucrando la coexistencia de un vulcanismo de tipo compresivo y otro de tipo distensivo.

Se considera que esta provincia magmática tuvo al menos cuatro pulsos de actividad: de 32 a 27 Ma, de 24 a 20 Ma, de 12 a 10 Ma y el último de menos de 5 Ma, además de que debió ser considerablemente más extensa y estar unida a la provincia volcánica de Baja California. Es ampliamente aceptado que la SMO está constituida básicamente por dos importantes secuencias volcánicas, la más antigua se conoce como Complejo Volcánico Inferior compuesta predominantemente por unidades piroclásticas de composición andesítica, con algunas intercalaciones de ignimbrita silícica, y la más joven la Secuencia Volcánica Superior constituida por tobas riolíticas y riodacíticas, con intercalaciones de tobas andesíticas y brechas volcánicas riolíticas. En la porción del acuífero que pertenece al estado de Durango afloran ambas secuencias. La más antigua aflora generalmente en las partes topográficamente más bajas de las barrancas, mientras que la secuencia superior ocupa la parte media y alta de la sierra. El emplazamiento de los cuerpos plutónicos de granito y granodiorita, así

como de los cuerpos hipabisales de composición diorítica y riolítica, coincide con la etapa de regresión del arco magmático hacia el occidente.

A partir del Oligoceno se produjeron una serie de esfuerzos distensivos que originaron una serie de fallas y fracturas regionales, de orientación general NW-SE, que sirvieron de conducto para el emplazamiento de estructuras volcánicas tipo plug y/o domos exógenos de composición riolítica. Coincidiendo con la formación del protogolfo de California hubo extensión y vulcanismo alcalino. En ese mismo periodo el frente volcánico de la SMO giró gradualmente de NW-SE a E-W y el carácter dominante de los magmas extravasados cambió de félsico a intermedio, estableciéndose la Faja Volcánica Transmexicana, la cual ha conservado esa orientación desde el Mioceno Medio, aunque el frente volcánico se ha desplazado hacia el sur (Carta Geológico-Minera El Salto F13-A18, escala 1: 50,000. SGM, 2009).

La principal estructura es un bloque tectónico hundido, conformando una fosa rellena de sedimentos clásticos semiconsolidados que tiene aproximadamente 35 km de longitud, ubicado entre las poblaciones El Tamarindo al sur y Palos Blancos al norponiente, aunque se extiende más allá del límite del acuífero. Al W de la fosa existe un pilar tectónico que está conformado por rocas antiguas pertenecientes a las unidades del Paleozoico Superior y Paleoceno, así como extensos afloramientos de cuerpos intrusivos granodioríticos, semi cubiertos por rocas más jóvenes del Grupo Volcánico Superior. Las estructuras circulares observadas en la interpretación de imágenes de satélite, tienen diámetros aproximados de 2 a 4 km y pueden estar relacionadas con cuerpos intrusivos a profundidad o focos de vulcanismo tipo caldera, producto de los últimos eventos magmáticos (Carta Geológico-Minera Cacalotán F13-A47, escala 1: 50,000. SGM, 2000).

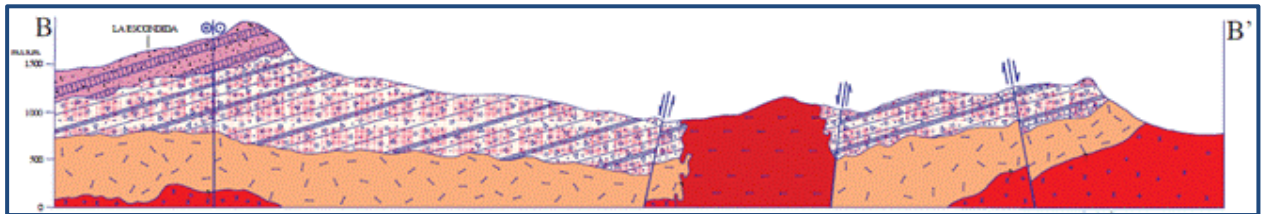
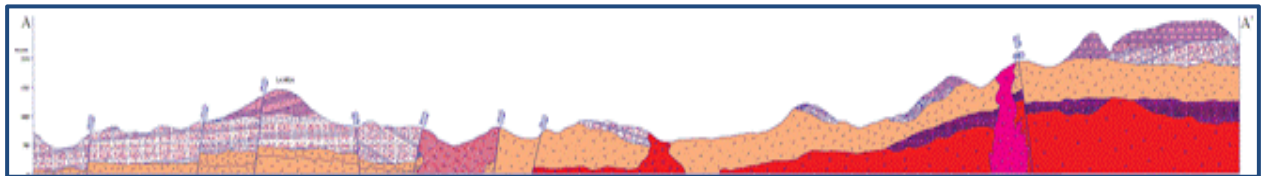
4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica, hidrogeológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes, así como por conglomerados polimícticos que rellenan los valles.

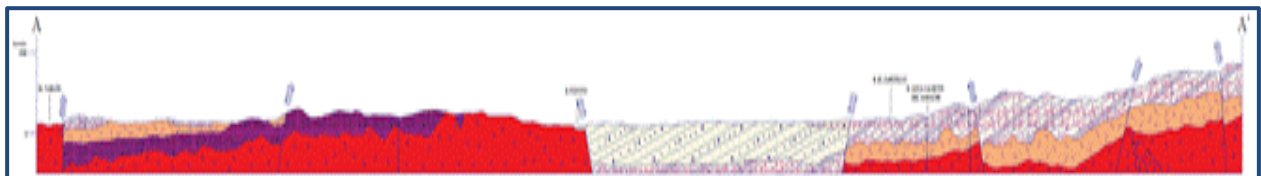
Esta es la unidad que se explota actualmente para satisfacer las necesidades de agua de la región. Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios cientos de metros de espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas

formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la revolución laramídica. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas como tobas ácidas, riolitas, ignimbritas y andesitas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

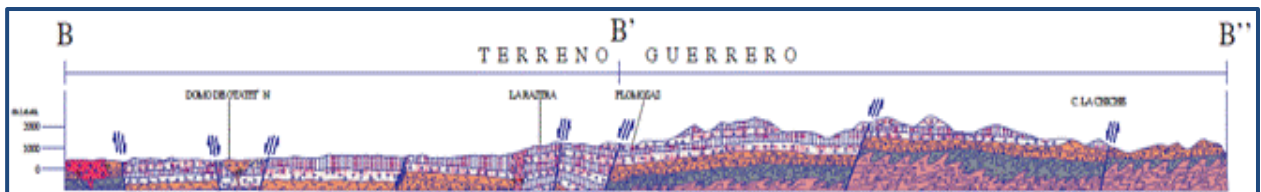
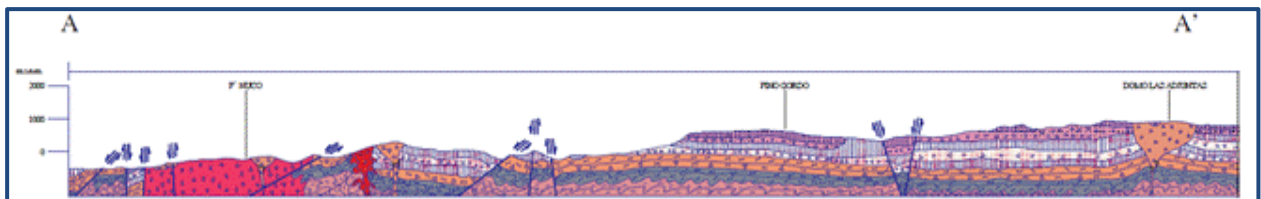
Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representados por las mismas rocas volcánicas, al desaparecer el fracturamiento, y por rocas intrusivas del Batolito de Sinaloa (figura 3).



FUENTE: Carta Geológica-Minera F13-A38 "Pueblo Nuevo", Escala 1: 50,000 (SGM, 1999)



FUENTE: Carta Geológica-Minera F13-A47 "Cacalotán", Escala 1: 50,000 (SGM, 2000)



FUENTE: Carta Geológico-Minera: F13-2 "El Salto" Escala 1:250.000 (SGM, 2000).

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos, de pie de monte y lacustres, así como por conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros en el centro del valle. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas volcánicas entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas, andesitas y basaltos, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se ejecutaron 3 pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y recuperación, sólo una de las cuales contó con pozo de observación; así como 6 pruebas más realizadas en 2014, y otras más de estudios previos llevados a cabo en ambos acuíferos (SARH, 1981).

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores promedio de transmisividad varían entre **187.3×10^{-3}** y **$0.09 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$21.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **7.2×10^{-4} a $8.3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (**62.2 a 0.7 m/d**), con un valor promedio de **$3.05 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (**26.4 m/d**)**, que se asocian a sedimentos de granulometría media a fina.**

El valor del coeficiente de almacenamiento obtenido en la prueba de bombeo realizada en 2013, varía de 0.1 a 0.3. Para el propósito del balance de aguas subterráneas, se consideró un valor promedio de rendimiento específico **Sy** de **0.15**.

Los valores más bajos de estos parámetros se asocian a los sedimentos clásticos de granulometría más fina y los más altos a los depósitos aluviales de mayor granulometría que conforman el cauce de los ríos, arroyos y sus planicies de inundación.

5.3. Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información recabada como parte de las actividades de los estudios realizados en 2013 y 2014, además de registros históricos durante el periodo 2003-2019, obtenidos por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, en la red de monitoreo piezométrico. Para

el planteamiento del balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2009-2019 que tiene mayor y mejor distribución espacial. Debido a que los niveles estáticos se han mantenido más o menos constantes, únicamente se describen las configuraciones del 2016.

5.4. Comportamiento hidráulico

5.4.1. Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel del agua subterránea en el año 2019 presentó valores que variaron de 2 a 8m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y del cauce de ríos y arroyos hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles. Los niveles estáticos más someros, de 2 a 4 m, se registran en la zona costera, entre los poblados Majahual y La Jarilla, así como en la barra arenosa de la Laguna El Huizache o Caimanero; desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente. Los más profundos, de 6 a 8 m, se presentan hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas que delimitan el valle (figura 4).

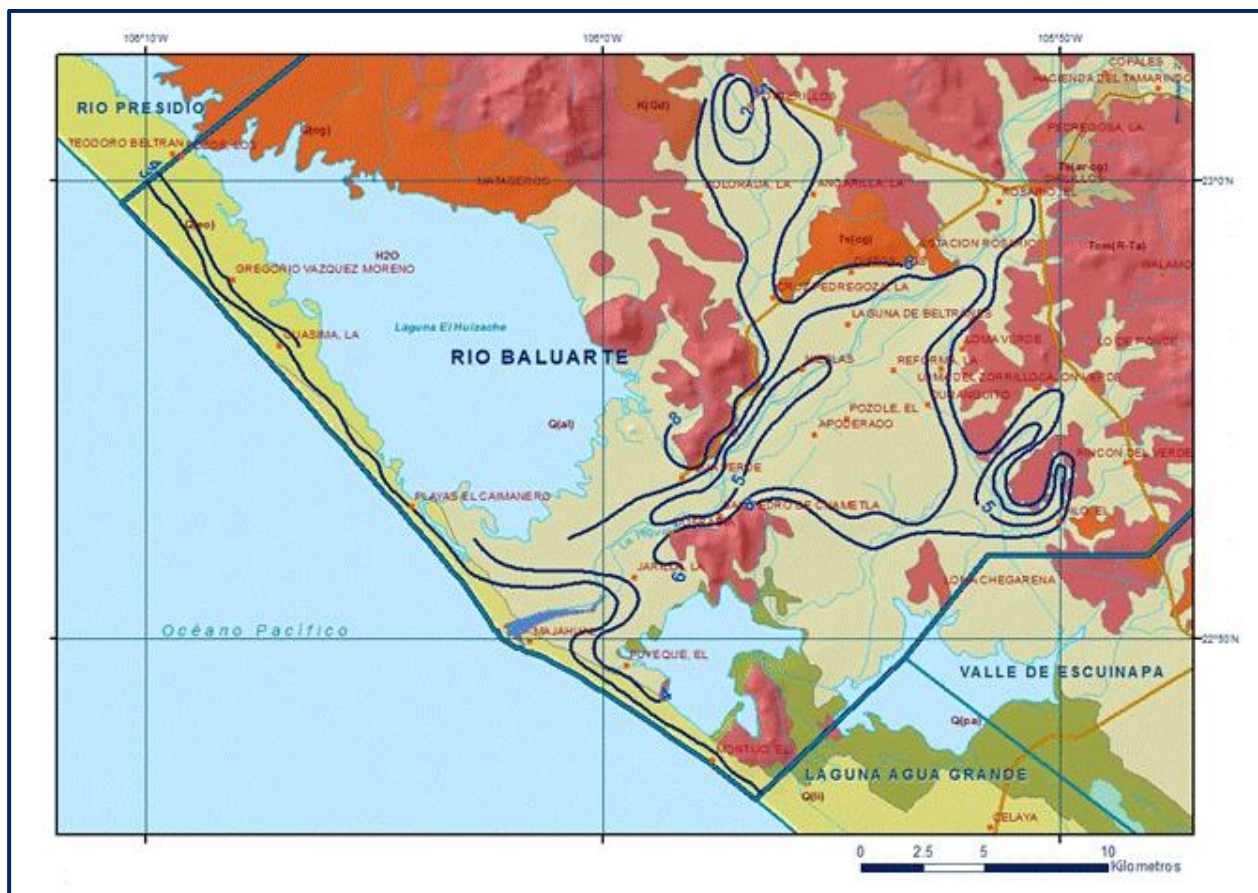


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

5.4.2. Elevación del nivel estático

De acuerdo con la configuración de elevación del nivel estático, en 2019 se registraron valores que variaron de 23 a 0 msnm, que se incrementan de la zona costera del valle hacia los flancos de las sierras que delimitan el acuífero y aguas arriba a lo largo del cauce del Río Baluarte. Los valores más altos, de 20 a 23 msnm, se registran en la porción norte del valle, en la zona del poblado Potrerillos, desde donde descienden gradualmente por efecto de la topografía, al igual que los valores de profundidad, hacia la zona costera. Los valores más bajos, de 0 a 2 msnm, se presentan en toda la franja costera y en la zona que conduce a la desembocadura del Río Baluarte, entre los poblados Cofradía y Majahual. La dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste, paralela a la dirección de escurrimiento del Río Baluarte (figura 5).

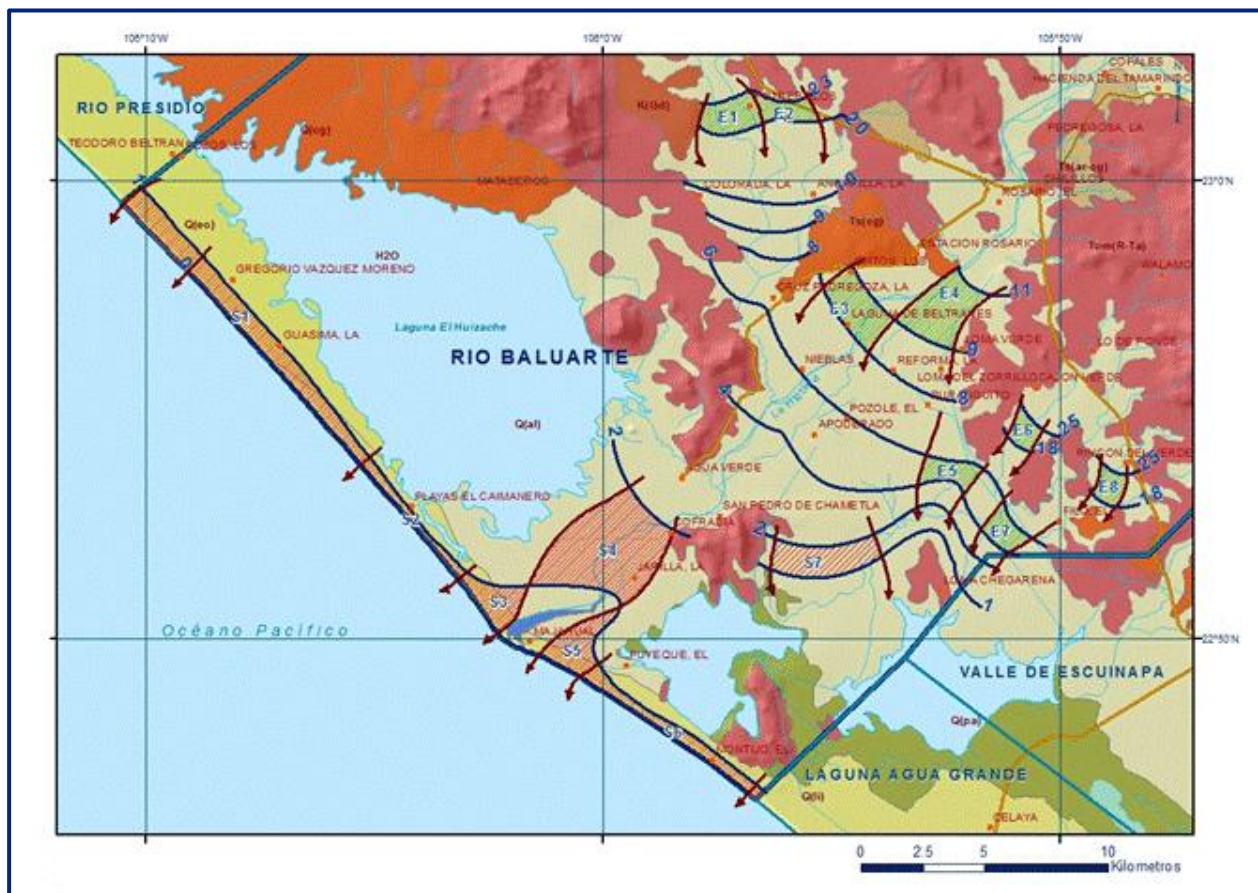


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 registró recuperaciones en la posición de los niveles del agua subterránea en la mayor parte de la zona de explotación debido a que en los últimos años ocurrieron precipitaciones

superiores a la media anual. Por esta razón y porque el volumen de recarga es superior al de extracción, no se observan conos de abatimiento que distorsionen la dirección natural del flujo subterráneo hacia el mar. Los valores de recuperación varían de 0.5 a 2.0 m, que representan un promedio anual de 0.1 a 0.2 m, con valores muy locales de 4 m, es decir 0.4 m anuales. En la mayor parte de la zona agrícola se registró una recuperación media anual de 0.1 m (figura 6).

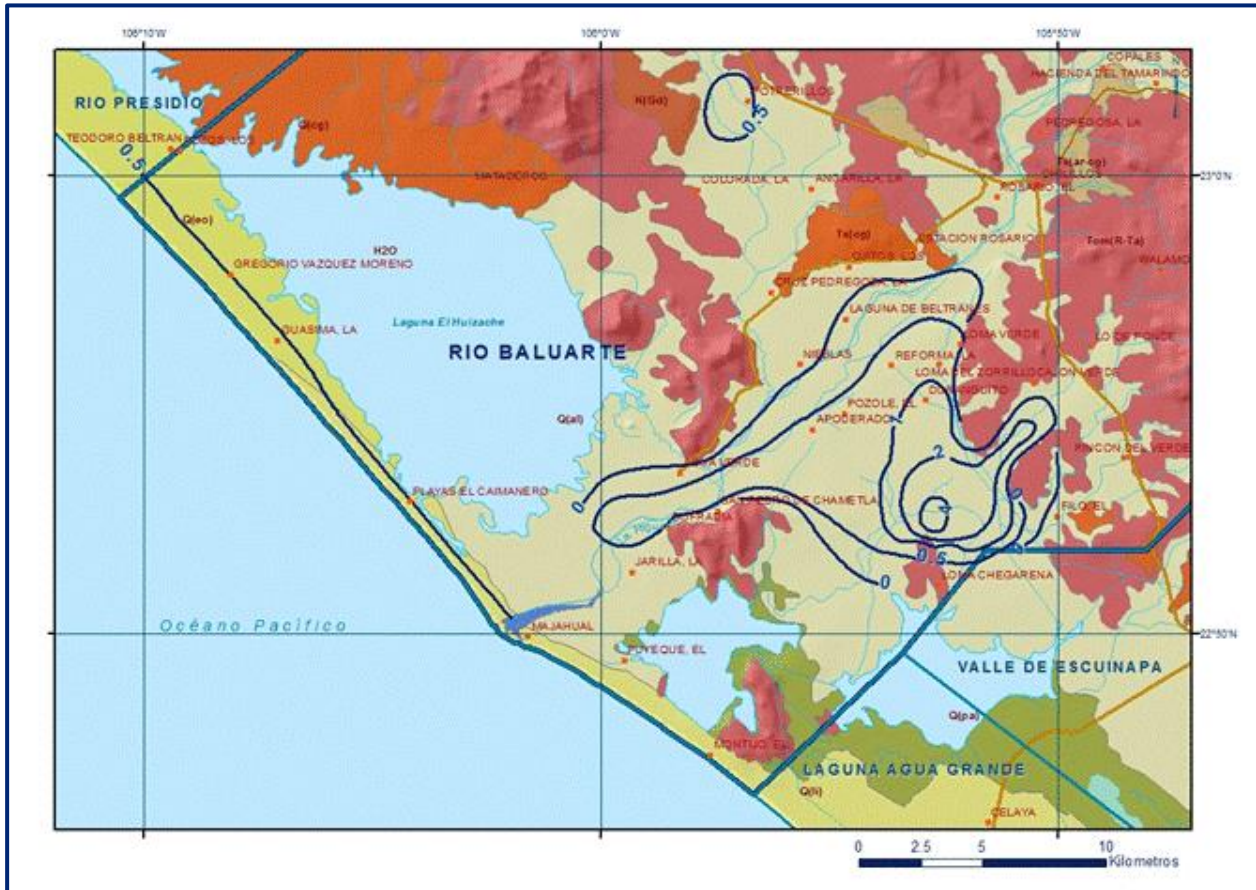


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2019)

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2013, se tomaron 5 muestras de agua subterránea y 5 más en el estudio realizado en 2014, en aprovechamientos distribuidos en la zona de explotación, para la caracterización hidrogeoquímica y su análisis fisicoquímico correspondiente. Las determinaciones incluyeron parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, nitratos, dureza total, sólidos totales disueltos, Fe, Mn, coliformes fecales y totales, así como metales pesados, para

identificar los procesos geoquímicos o de contaminación y comprender el modelo de funcionamiento hidrodinámico del acuífero.

De manera general, las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, para los diferentes usos. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) presenta valores que varían de 50 a 450 ppm, que no sobrepasan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido en dicha la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano.

Las 10 muestras presentan concentraciones de coliformes fecales y totales mayores al límite máximo permisible (LMP) que establece la norma mexicana; en la mayoría de ellas (6 muestras) se supera el LMP de manganeso.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce, ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 113 a 929 μ S/cm. Los valores más bajos de STD y conductividad eléctrica se registran en la región norte del acuífero, y se incrementan en dirección general hacia el sur, confirmando con ello la dirección preferencial del flujo subterráneo. Los valores de temperatura varían de 20.4 a 30.0 °C y los de pH de 6.3 a 7.6.

Para determinar la calidad del agua para uso en riego, se utilizó la clasificación de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), 3 de las muestras analizadas se clasifican C₁-S₁, que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; 4 muestras más como C₂-S₁, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; y 3 muestras se clasifican como C₃-S₁, es decir alta salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable. Las 7 primeras muestras son aptas para la agricultura sin restricción alguna y las 3 últimas requieren lavado del suelo y utilizarse en cultivos tolerantes a la salinidad. Con respecto a las familias del agua por ion dominante, se presentan las familias bicarbonatada-cálcica, y bicarbonatada-cálcico-magnésica que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos, llevado a cabo como parte del estudio realizado en el 2013, se identificaron un total de 1,151 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 26 son pozos, 206 norias, 911

puntas, 3 jagüeyes 3 manantiales y 2 galerías filtrantes; del total de obras, 1147 están activas y 4 inactivas.

De acuerdo con su clasificación por usos, de las 1147 obras activas, 1100 se utilizan en la agricultura, 30 para abastecimiento de agua potable a las comunidades de la región, 13 para uso doméstico-pecuario, 1 para uso industrial y 3 para otros usos. El volumen de extracción asciende a **44.2 hm³ anuales**, de los cuales 32.8 hm³ (74.2%) se destinan al uso agrícola, 10.3hm³ (23.3%) se utilizan para uso público-urbano y 1.0 (2.3%) para uso doméstico-pecuario y 0.1 hm³ (0.2%) para otros usos. Adicionalmente, a través de los **3 manantiales** se descarga un caudal de 19 lps, que representa un volumen anual de **0.6 hm³**, destinados al uso agrícola.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2009-2019, en una superficie de **447 km²**, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

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

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

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

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

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga total que recibe (R) ocurre por tres procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los ríos y arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera incidental, la infiltración de los excedentes del riego agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otras fuentes de recarga al acuífero. Estos volúmenes se integran en la componente de recarga incidental (Ri).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información piezométrica para calcular el cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

$$Rv + Ri + Eh - B - Sh - ETR - Dm - Dfb = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

- Rv:** Recarga vertical
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Ri:** Recarga incidental
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- ETR:** Evapotranspiración real
- Dm:** Descarga de manantiales
- Dfb:** Descarga por flujo base
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

$$Rv = B + Sh + ETR + Dm + Dfb - Eh - Ri \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

Para su cálculo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2019 mostrada en la figura 5. Con base en ella se seleccionaron

canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

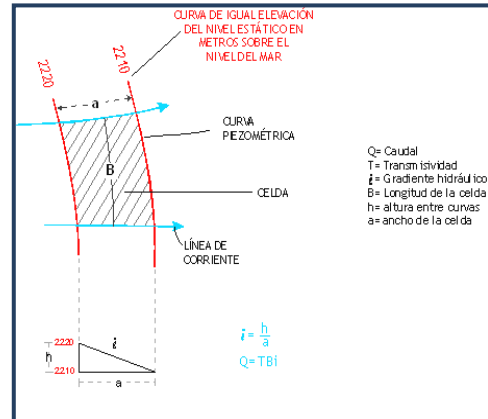
Donde:

Q: Caudal (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s)

B: Longitud de la celda (m)

i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado de la región donde se localizan las celdas. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada una de las celdas establecidas, en la tabla 2 se observan los valores obtenidos en cada celda. El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **48.0 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	2230	1350	3	0.00222	0.0350	0.1734	5.5
E2	2080	880	3	0.00341	0.0350	0.2482	7.8
E3	2910	1520	1	0.00066	0.0600	0.1149	3.6
E4	1910	2800	2	0.00071	0.0600	0.0819	2.6
E5	2070	910	2	0.00220	0.0350	0.1592	5.0
E6	1045	409	7	0.01711	0.0250	0.4471	14.1
E7	1160	1110	2	0.00180	0.0350	0.0732	2.3
E8	1080	1340	7	0.00522	0.0400	0.2257	7.1
TOTAL							48.0

7.1.3 Recarga incidental(Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de las propiedades del suelo, de las condiciones climáticas y de la profundidad al nivel estático. Esta contribución al acuífero se le conoce como retorno de riego y según Jacob Bear (1970) su valor varía entre el 20 y 40

% del volumen usado en la irrigación. Debido a la falta de información confiable de láminas de riego por cultivo, se considera que el 20% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, considerando la profundidad somera al nivel del agua subterránea en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media en el subsuelo.

De esta manera, tomando en cuenta que para uso agrícola se utiliza un volumen promedio anual de 109.4 hm³, de los cuales 76.0 hm³ son de agua superficial (63.4 hm³ proveniente de las presas Higueras y Siqueros y 12.6 hm³ de tomas directas del Río Baluarte) y 33.4 hm³ de agua subterránea (32.8 de extracción por bombeo y 0.6 hm³ de la descarga de los manantiales), al aplicar el 20% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 21.9 hm³ anuales. Por otra parte, las pérdidas por fugas en las redes de distribución de agua potable y alcantarillado varían según la zona y su estado físico, para este caso se consideró también un coeficiente de infiltración de 20%, que aplicado al volumen destinado al uso público-urbano de 10.3 hm³ resulta un volumen de 2.1hm³ anuales. Por lo tanto, $R_i = 21.9 + 2.1 = 24.0$. **Ri = 24.0 hm³/año**

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente a través del bombeo (B), por salidas subterráneas horizontales (Sh), por evapotranspiración (ETR) en las áreas de niveles freáticos someros, descarga a través de manantiales (Dm) y por flujo base del río (Dfb).

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **44.2 hm³ anuales**.

7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2019, mostrada en la figura 5, tal como se muestra en la tabla 3. El volumen total de salidas por flujo horizontal subterráneo asciende a **38.5 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal (2019)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	13799	824	1	0.0012	0.0150	0.2512	7.9
S2	5910	285	1	0.0035	0.0200	0.4147	13.1
S3	2600	1270	1	0.0008	0.0200	0.0409	1.3
S4	3780	3840	1	0.0003	0.0350	0.0345	1.1
S5	1870	1700	1	0.0006	0.0300	0.0330	1.0
S6	7810	530	1	0.0019	0.0250	0.3684	11.6
S7	4152	1286	1	0.0008	0.0250	0.0807	2.5
TOTAL						38.5	

7.2.3. Evapotranspiración (ETR)

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real). El escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR) es un parámetro utilizado para la recarga potencial de infiltración.

Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.6 °C y 906.7 mm, representativos del área de balance. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 841.9 mm anuales, como se muestra a continuación:

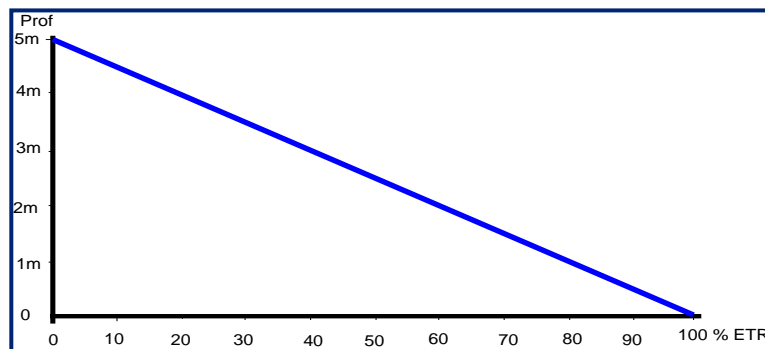
$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	25.6		
P(mm) =	906.7	P ² =	822104.89
L =	1778.8608	L ² =	3164345.75
ETR (mm)	841.9		

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 5 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 5 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 5 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 5 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 4 m el 20%, a 2 m el 60% etc.



De esta manera, la estimación del valor de la evaporación se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el porcentaje que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior, tomando en cuenta las superficies entre curvas de igual valor de profundidad al nivel estático. El cálculo se puede observar en la tabla 4. El volumen de evapotranspiración **ETR =10.1 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km ²)	LÁMINA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm ³ /año)
2	2	1.8	0.8419	0.6	0.9
3	3	8.7	0.8419	0.4	2.9
4 a 3	3.5	20.7	0.8419	0.3	5.2
5 a 2	3.5	4.3	0.8419	0.3	1.1
	Total	35.5		Total	10.1

7.2.4. Descarga por manantiales (Dm)

La descarga a través de los 3 manantiales censados se estimó en 19 lps, que representa un volumen anual de 0.6 hm³. **Dm =0.6 hm³ anuales.**

7.2.5. Flujo base (Dfb)

De acuerdo con los datos de la estación hidrométrica “Baluarte II”, proporcionada por el Organismo de Cuenca Pacífico Norte, el Río Baluarte presentó un caudal estimado de 6.293 m³/s de flujo base en el estiaje del periodo 1947-2014, que representa un volumen anual de 198.4 hm³. Por lo tanto, **Dfb = 198.4 hm³ anuales**.

7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S)

El cálculo del cambio de almacenamiento se realizó a partir de la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2009-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.15, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔV(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 detalle de cálculo se presenta en la tabla 5, en la que se puede observar que el cambio de almacenamiento para el periodo es de 16.1 hm³, es decir, un promedio anual de 1.6hm³. Por lo tanto, **ΔV(S) = 1.6 hm³anuales**.

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
0 a 0.5	0.25	32.8	0.15	1.2
0.5	0.50	21.5	0.15	1.6
0.5 a 1	0.75	42.0	0.15	4.7
1 a 2	1.50	15.2	0.15	3.4
2 a 4	3.00	10.0	0.15	4.5
4	4.00	1.1	0.15	0.7
TOTAL		122.8	TOTAL	16.1
Promedio anual				1.6

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\begin{aligned} R_v &= B + Sh + ETR + D_m + D_{fb} - E_h - R_i \pm \Delta VS \\ R_v &= 44.2 + 38.5 + 10.1 + 0.6 + 198.4 - 48.0 - 24.0 + 1.6 \\ R_v &= 221.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

De esta manera, la recarga total media anual estará definida por la suma de las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_i \\ R &= 221.4 + 48.0 + 24.0 \\ R &= 293.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales} \end{aligned}$$

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:

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

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, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **293.4 hm³/año**, de los cuales 269.4 hm³ son recarga natural y 24.0 hm³ recarga incidental.

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 Río Baluarte, se considera que el valor de la descarga natural comprometida es de **237.5 hm³ anuales**, de los cuales 38.5 hm³ corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina, 0.6 hm³ a la descarga a través de manantiales y 198.4hm³ al flujo base del Río Baluarte.

No se considera comprometido el volumen de evapotranspiración porque ésta se produce principalmente a lo largo del cauce del Río Baluarte y porque es alimentada por el flujo base y por las salidas subterráneas hacia el mar en la zona costera. **DNC = 237.5 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 (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 **92,267,463 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos del 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 293.4 - 237.5 - 92.267463 \\ \text{DMA} &= - 36.367463 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones, por el contrario, el **déficit** es de **36,367,463 m³**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2005. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Baluarte, estado de Sinaloa.

Comisión Nacional del Agua, 2008. Estudio de reactivación de redes de monitoreo piezométrico y calidad del agua en los acuíferos Río Baluarte, Valle de Escuinapa, Laguna Agua Grande y Río Cañas, Sinaloa. Realizado por SABINFOSISTEM, S.A. de C.V.

Comisión Nacional del Agua, 2013. Estudio geohidrológico para actualizar la disponibilidad media anual de aguas subterráneas de los acuíferos de los Ríos Presidio, Baluarte, Valle de Escuinapa y Laguna Agua Grande en el estado de Sinaloa. Realizado por Proyectos, Estudios y Servicios en Ciencias e Ingeniería Agrícolas, S.A. de C.V. (PRESENCIA)

Comisión Nacional del Agua, 2014. Integración del estudio técnico justificativo de los acuíferos Río Elota clave 2506, Río Piaxtla clave 2507, Río Quelite clave 2508, Río Baluarte clave 2510 y Laguna Agua Grande clave 2512, en el estado de Sinaloa. Elaborado por SANX Ingeniería Integral y Desarrollo, S.A. de C.V. (SIIDSA)

Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Pacífico Norte, 2019. Información piezométrica del acuífero Río Baluarte, estado de Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1981. Estudio de hidrología superficial y subterránea en los arroyos Quelite, Pozole y Presidio, en Mazatlán, estado de Sinaloa. Realizado por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., Consultores.

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera F13-1 "Mazatlán", escala 1: 250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera F13-A38 "Pueblo Nuevo", escala 1: 50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2000. Carta Geológico-Minera "Cacalotán" F13-A47, escala 1: 50,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2000 Carta Geológica-Minera F13-2 "El Salto", escala 1: 250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2009. Carta Geológico-Minera "El Salto" F13-A18, escala 1: 50,000.