CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA EN EL ACUÍFERO LAGUNA AGUA GRANDE (2512), ESTADO DE SINALOA

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES 2
Antecedentes 2
1.1. Localización 2
1.2. Situación administrativa del acuífero 3
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD 4
3. FISIOGRAFÍA 6
3.1. Provincia fisiográfica 6
3.2. Clima 7
3.3. Hidrografía 8
3.4. Geomorfología 8
4. GEOLOGÍA 8
4.1. Estratigrafía 9
4.2. Geología estructural 12
4.3. Geología del subsuelo 13
5. HIDROGEOLOGÍA 14
5.1. Tipo de acuífero 14
5.2. Parámetros hidráulicos 14
5.3. Piezometría 14
5.4. Comportamiento hidráulico 15
5.4.1. Profundidad al nivel estático 15
5.4.2. Elevación del nivel estático 16
5.4.3. Evolución del nivel estático 16
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea 17
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA 18
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 19
7.1. Entradas 19
7.1.1. Recarga vertical (Rv) 19
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh) 20
7.1.3 Recarga incidental(Rr) 21
7.2. Salidas 22
7.2.1. Bombeo (B) 22
7.2.2. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) 22
7.2.3. Evapotranspiración (ETR) 23
7.3. Cambio de almacenamiento ΔV(S) 24
8. DISPONIBILIDAD 25
8.1. Recarga total media anual (R) 26
8.2. Descarga natural comprometida (DNC) 26
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS) 26
8.4. Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) 27
9. BIBLIOGRAFÍA 28

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 Laguna Agua Grande, definido con la clave 2512 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en el extremo suroriental del estado de Sinaloa, entre los paralelos 22°28'00" y 22°49'36" de latitud norte y 105°39'32" y 105°56'42" de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 395km^2.

Limita al norte con el acuífero Valle de Escuinapa; al este con Río Cañas, ambos pertenecientes al estado de Sinaloa; al sur con el acuífero Valle Acaponeta-Cañas del estado de Nayarit y al oeste su límite natural es el Océano Pacífico (figura 1). Geopolíticamente el área que cubre la totalidad de la superficie del acuífero se localiza en el municipio de Escuinapa.

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 2512 LAGUNA AGUA GRANDE							
VERTICE	**LONGITUD OESTE**			**LATITUD NORTE**			**OBSERVACIONES**
	GRADOS	**MINUTOS**	**SEGUNDOS**	**GRADOS**	**MINUTOS**	**SEGUNDOS**	
1	105	56	40.7	22	46	29.9	
2	105	53	25.0	22	49	35.0	
3	105	42	20.0	22	41	10.1	
4	105	39	30.9	22	34	53.8	DEL 4 AL 5 POR EL LIMITE ESTATAL
5	105	45	27.5	22	32	14.7	DEL 5 AL 1 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
1	105	56	40.7	22	46	29.9	

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 agrícola. En su territorio no se localiza ningún Distrito de Riego ni se ha constituido a la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). El acuífero se localiza en su totalidad en el Santuario Playa El Verde Camacho, decretado el 16 de julio de 2002, y en el sitio RAMSAR Marismas Nacionales, considerado como tal desde el 22 de junio de 1995.

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:

EVALUACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA ZONA ELOTA-CAÑAS EN EL ESTADO DE SINALOA. Realizado en 1978 por Consultores, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Su objetivo fue determinar el potencial de los acuíferos alojados en la planicie costera de esta porción del estado de Sinaloa, para planear su aprovechamiento racional, mediante la perforación de pozos de explotación que permitieran sostener la actividad agrícola. Entre sus actividades más relevantes destacan censo y piezometría, hidrometría de las extracciones, muestreo de agua para análisis fisicoquímicos y ejecución de pruebas de bombeo.

SERVICIOS DE PROSPECCION Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS Y GEOFÍSICOS EN LA ZONA DE ESCUINAPA, ESTADO DE SINALOA. Realizado en 1978 para la Secretaría de Agricultura y Recurso Hidráulicos (SARH), por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A. (EGEOCISA).

El objetivo del estudio fue determinar las condiciones hidrogeológicas que prevalecían en los valles intermontanos de la zona de Escuinapa y localizar las áreas adecuadas para la extracción y aprovechamiento del agua subterránea. Aunque su actividad principal fue la ejecución de sondeos geofísicos, también llevó a cabo la piezometría y muestreo de agua subterránea.

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 GEOHIDRÓLOGICO 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 LAGUNA AGUA GRANDE, 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 2013, 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 la totalidad del acuífero se localiza en 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 Llanura Costera del Pacífico, Subprovincia Delta del Río Grande de Santiago.

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 Delta del Río Grande de Santiago tiene como rasgo fisiográfico característico el delta del Río Grande de Santiago, el cual tuvo su época de mayor crecimiento durante la glaciación pleistocénica. Cuando la mayor parte de los hielos se fundieron, las aguas marinas invadieron grandes superficies litorales que habían estado emergidas y la línea de costa quedó varios kilómetros tierra adentro con respecto a la actual.

En los últimos milenios, el aporte de materiales arenosos por vía fluvial y por arrastre de arenas marinas a través del oleaje, ha dado origen a una constante recuperación de territorio, manifestada en las barras arenosas paralelas constituidas por suelos litorales que integran la saliente del delta; los suelos aluviales predominan aguas arriba de las corrientes que drenan esta llanura. En esos materiales geológicos se han desarrollado rasgos hidrográficos de origen mixto o de transición como es el caso de las lagunas.

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 establece que en la superficie que cubre el acuífero domina el clima cálido subhúmedo (Aw0) que se caracteriza por registrar precipitaciones de verano entre 1,000 y 2,000 mm anuales, temperatura máximas mayores a 35 °C, mínimas inferiores a 23 °C y media anual mayor a 22°C. Presenta régimen de lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10 del total, el promedio de la precipitación del mes más seco es de menos de 60 mm. El cociente entre la precipitación y la temperatura es menor a 43.2.

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 3 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Rosario, La Concha y Tecuala, con un periodo de registro que comprende de 1991 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 **976.5mm** y **25.8 °C** respectivamente. De igual manera, con respecto a la evaporación potencial, se obtuvo un valor promedio de **1,748.6 mm anuales.**

3.3. Hidrografía

El acuífero Laguna Agua Grande 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 Acaponeta, subcuenca El Palote-Higueras.Debido a la topografía plana de la superficie cubierta por el acuífero, no existen corrientes superficiales, solo el arroyo Buñigas que nace fuera de la zona, atraviesa el poblado Escuinapa y llega a la Laguna Agua Grande.

3.4. Geomorfología

El área del acuífero se encuentra en la planicie costera y forma parte de un estuario, limita al oriente con la Sierra Madre Occidental que está constituida principalmente por rocas ígneas extrusivas. Al norte del área, fuera del acuífero se observan algunas lomas aisladas dentro de la Isla Palmito, donde se encuentra alojado este acuífero.

La planicie costera está constituida por sedimentos clásticos continentales del Cenozoico y depósitos aluviales y marinos del Reciente. La barra arenosa que conforma la zona tiene forma plana, con pendiente hacia el mar y hacia la laguna, de manera similar a una isla. Sobre ellas se han desarrollado meandros, algunos de los cuales forman pequeñas lagunas semicirculares de escasa profundidad. Estas lagunas litorales constituyen rasgos fisiográficos distintivos del litoral de Sinaloa.

En la zona costera, fuera de la desembocadura de los ríos, existe una serie de bermas o antiguas líneas de costa en las que se aprecian franjas alargadas entre 50 y 300 m de ancho. Forman leves ondulaciones cuyas partes bajas se encuentran por lo general encharcadas. Existen manglares a lo largo de ríos y lagunas costeras, así como dunas en la cercanía de las costas. Las playas son amplias, de pendiente suave y uniforme.

4. GEOLOGÍA

Hacia el norte y oriente de la región donde se localiza el acuífero, fuera del mismo, afloran rocas ígneas extrusivas ácidas, conglomerados, areniscas y clásticos de diversos tamaños, con una matriz tobácea, que forman los pies de monte y abanicos aluviales. En toda la superficie del acuífero afloran depósitos del Cuaternario- Reciente, constituidos por arenas de diferente granulometría, limos y arcillas, de origen continental, mixto y continental-marino, producto de los agentes erosivos, que corresponden a antiguas líneas de costa y barras arenosas, asociados con depósitos característicos de la zona como son las bermas, dunas estabilizadas, llanura de inundación mixta, llanuras de inter-marea, manglares, dunas activas y de playa (figura 2).

El acuífero se encuentra localizado en la Isla Palmito-El Verde, que forma parte de la llanura costera conformada por depósitos sedimentarios de origen continental, que fueron generados por la influencia de los ríos Baluarte y Cañas; así como por la presencia de depósitos lacustres y sedimentos derivados de la acción marina del oleaje y mareas y de origen eólico.

En la base de la columna se tiene depósitos de limo-arena de granulometría fina a media, con poca a nula compactación, formando algunas terrazas aluviales. El contacto inferior no se observa, pero se infiere que cubre discordantemente a las rocas que conforman la Sierra Madre Occidental. Ocupan la mayor parte de la superficie del acuífero. Los depósitos de limo-arena subyacen de manera discordante a los depósitos palustres constituidos también de limo-arena, pero con aporte de materia orgánica, principalmente de origen vegetal, que proviene de las corrientes de los ríos que desembocan en las depresiones costeras y que forman las lagunas y esteros separados del mar por una barrera arenosa pero comunicada por canales o bocas.

En esta unidad se aloja material clástico proveniente de la porción continental, en parte constituido arenas negras, que presentan concentraciones de magnetita y titanio, localmente estas concentraciones se identificaron en las inmediaciones de la Laguna Agua Grande y en los esteros Agua Grande, El Maíz, Teacapan y Puerto del Río. Los aluviones están constituidos por material clástico no consolidado de fragmentos redondeados a subredondeados, de granulometría que varía de cantos rodados, pasando por grava, arena y limo.

Su espesor es variable, llegando a alcanzar hasta 10 m. Finalmente y con relaciones discordantes con las unidades anteriores, se tienen depósitos de arena moldeada por las corrientes de deriva, mareas y el oleaje, que corresponden a la unidad litoral, constituida por depósitos formados en la zona de intermarea, por la acción mixta de ambientes continentales y marinos.

Generalmente estos depósitos están constituidos por arcillas, limos y zonas de arenas de tamaño fino a muy fino. Conceptualmente estos depósitos se caracterizan por intensos procesos de intercambio de materia y energía (Carta Geológico-Minera Teacapan F13-A67. Escala 1:50,000. SGM, 2015).

4.1. Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Cuaternario al Reciente.

CUATERNARIO. PLEISTOCENO

Depósitos Clásticos

Consisten en depósitos de pie de monte y abanicos aluviales compuestos por peñascos, bloques y guijarros de composición variable empacados en una matriz areno-arcillosa o tobácea, ocasionalmente bien cementados, cuyo espesor es muy variable. Sus afloramientos principales se encuentran en la porción noreste del área, fuera del límite del acuífero, en las inmediaciones de los poblados El Remolino, Las Lomitas y El Hueco, así como también en una franja comprendida entre los poblados Tecualilla y La Campana.

Llanura deltaica

Esta unidad está representada por conglomerados, sedimentos arenosos y areno-limosos que presentan una clasificación pobre y estratificación cruzada, así como materiales arenosos, areno-arcillosos y arcillosos con abundante materia orgánica. Forma parte de la llanura costera y presenta un relieve de lomeríos muy suaves que son remanentes de la superficie preexistente. Aflorando al sur de Escuinapa.

RECIENTE

Llanura deltaica

Con este nombre se agrupan a los depósitos deltaicos originados por los grandes ríos, constituidos por conglomerados de fragmentos ígneos y metamórficos, arenas, limos y arcillas, estas últimas ricas en 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. Se localizan en las márgenes de los ríos, conformando superficies planas, ligeramente inclinadas hacia el mar. Presentan meandros abandonados que manifiestan la magnitud de los movimientos laterales de los ríos.

Bermas

Formadas por arenas de cuarzo y feldespatos de grano fino y medio con fragmentos de conchas, que constituyen antiguas líneas de costa y se presentan en forma de lineamientos ondulados, sensiblemente paralelos a la costa actual. En sección son asimétricos con pendientes pronunciadas en su flanco hacia el mar y pendiente suave en su flanco hacia el continente.

Manglar

Están formados por sedimentos finos como limos y arcillas que se encuentran saturados (fango). Fueron depositados en los ambientes de transición, en las regiones hacia el continente de las barreras arenosas, en las zonas bajas protegidas y en las rías. Se encuentran asociados con los bosques de manglar.

Figura 2. Geología general del acuífero

Dunas estabilizadas

Esta unidad se encuentra formada por arenas bien clasificadas de origen eólico que han sido fijadas por vegetación o bien por la acción de aguas circulantes. Se presentan en forma de dunas asimétricas con alturas hasta de 30 m dentro de las cuales se aprecia estratificación cruzada típica.

Llanuras mixtas de inundación

Consisten en sedimentos limosos y arcillosos (lodos negros) ricos en materia orgánica. No presentan estructuras y se localizan hacia las partes bajas próximas a la desembocadura de las corrientes superficiales. Están sujetas a la acción de las mareas y las avenidas de los ríos.

Llanuras de inundación

Depósitos originados por los ríos y arroyos actuales dentro de sus cauces de inundación, en donde se encuentran gravas, arenas y arcillas. Las gravas se presentan hacia el lecho de los canales, las arenas en las márgenes de los mismos, y hacia la llanura de inundación predominan arenas y arcillas.

Dunas activas

Están constituidas de arenas de cuarzo y feldespato de grano medio, bien clasificadas, de origen eólico. Se presentan en forma de cordones más o menos paralelos, los cuales son normales a la dirección del viento; de tipo asimétricas y en su superficie presentan rizaduras.

Depósitos de playa

Con este nombre se designan a los sedimentos arenosos producto de la acción del oleaje, constituidos por arenas de grano fino a medio, bien clasificadas, de origen marino compuestos de cuarzo y feldespato, que se encuentran a lo largo de las costas, con suave pendiente hacia el mar.

Llanuras de intermarea

Esta unidad conforma las partes bajas y planas localizadas en las lagunas y barreras litorales que son inundables por la acción de las mareas. Están constituidas por arenas de grano medio y fino, arcillas y en ocasiones gravas. Prácticamente no tienen materia orgánica y no presentan estructuras.

4.2. Geología estructural

Estructuralmente la región está dominada por dos direcciones de fallas normales y fracturas, uno de orientación norte-sur y el otro orientado N70°E, que podrían corresponder a un sistema conjugado contemporáneo. Los rasgos tectónicos mayores corresponde a fallas normales regionales que delimitan los bloques Acaponeta, Santa Lucía de la Sierra y Mesa del Nayar, basculados hacia el este y recostados uno sobre otro de poniente a oriente sobre un pilar tectónico denominado Horst de Ameca La Vieja, que se comporta como un bloque fijo que representa el límite entre los 2 dominios estructurales de la Sierra Madre Occidental: el dominio de grabens y horst (Basin and Ranges) típicos de la margen oriental de la Sierra Madre Occidental, y el dominio de semi-grabens que se extienden hacia el oeste de Escuinapa. Estos bloques conforman un escalonamiento hacia el occidente por efecto de los juegos de fallas normales, algunas de bajo ángulo a profundidad dispuestas paralelamente entre los bloques basculados sobre el bloque Ameca La Vieja (Carta Geológico-Minera Escuinapa F13-5. Escala 1:250,000. SGM, 1999).

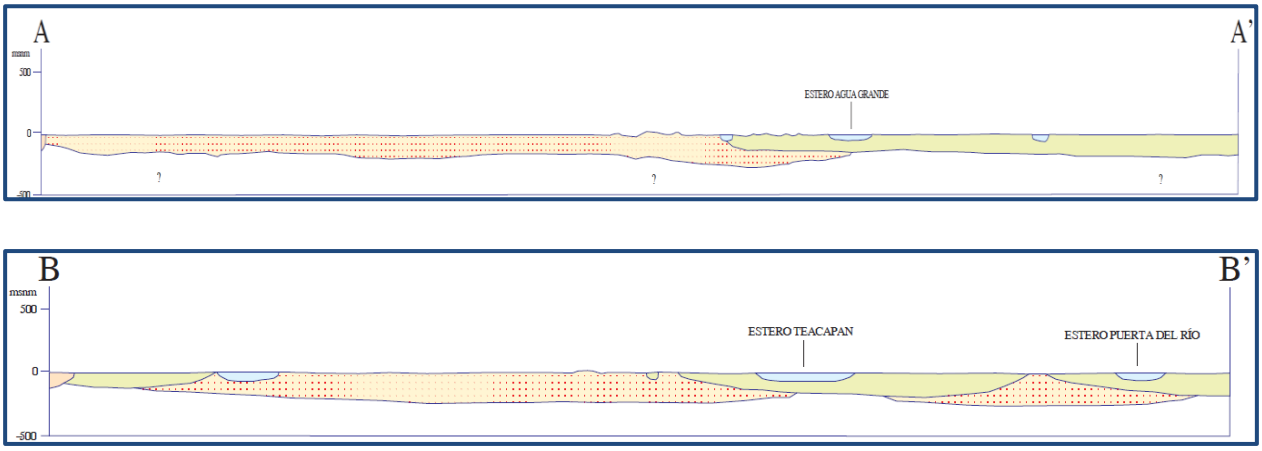
Son pocos los estudios que se han realizado sobre la evolución tectónica en el estado de Sinaloa, por tal motivo no existe registro geológico durante el Cuaternario, aunado al hecho de que dentro de la superficie del acuífero no existen afloramientos de rocas que presenten características o datos para correlacionarlos con eventos de deformación en el tiempo geológico.

Por tal razón la superficie que cubre el acuífero puede considerase como parte de una margen pasiva, que presenta un proceso de erosión y depósitos, producto de la intensa erosión de rocas preexistentes que conforman las Sierra Madre Occidental, de donde se derivan sedimentos que conforman los depósitos que rellenan los valles y partes bajas (Carta Geológico-Minera Teacapan F13-A67. Escala 1:50,000. SGM, 2015).

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 por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos y lacustres, de granulometría variada, producto del intemperismo de rocas preexistentes.

El acuífero se aloja en arenas de origen marino, sedimentos depositados en antiguas líneas de costa y por llanuras mixtas de inundación conformadas de limos y arcillas acumuladas por procesos marinos y pluviales en manglares, así como también depósitos de llanuras de intermarea formadas por cantidades variables de arcillas y limos. Las acumulaciones de materiales arenosos de origen marino son características de las barras arenosas, que por efecto de acumulación constante emergieron sobre la superficie del mar y después por la acción eólica forman una serie de dunas que alcanzaron su mayor elevación en la porción central, propiciando condiciones favorables para el almacenamiento de agua subterránea (figura 3).



FUENTE: Carta Geológica-Minera F13-A67 "Teacapan", Escala 1: 50,000 (SGM, 2015)

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 por sedimentos aluviales, fluviales, eólicos y lacustres, que presenta **condiciones locales de semiconfinamiento**. La delgada lente de agua dulce que flota sobre agua marina en este acuífero, es una restricción importante al aprovechamiento del agua subterránea. Hacia las estribaciones de las sierras, las rocas volcánicas, entre las que destacan las tobas ácidas, riolitas, ignimbritas y andesitas, conforman un medio fracturado con permeabilidad secundaria, que a mayor profundidad constituye el basamento hidrogeológico del acuífero.

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, 6 pruebas más realizadas en 2014, y otras más de estudios previos llevados a cabo en ambos acuíferos (SARH, 1978). De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores promedio de transmisividad varían entre **54.1 x10^{-3}** y **5.6 x10^{-6} m^2/s**, con un valor promedio de **15.0 x10^{-3} m^2/s.**

La conductividad hidráulica varía de **2.8 x10^{-3} a 1.1 x10^{-6} m/s (242 a 0.1 m/d)**, con un valor promedio de **6.6 x 10^{-4}m/s (57.0 m/d)**, que se asocian a sedimentos de granulometría media a fina.

Ninguna de las pruebas de bombeo contó con pozo de observación, por lo que fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. Para el propósito del balance de aguas subterráneas, se consideró un valor promedio de rendimiento específico **Sy** de **0.2.**

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 y fluviales de mayor granulometría que conforman las 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 delos 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 2015-2019 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 2019.

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 de0.5 a 2.5m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía de la zona costera y lagunar hacia la porción central de la barra arenosa. Los niveles estáticos más someros, de 0.5 a 1 m, se registran precisamente en estas zonas marginales que rodean a la superficie del acuífero, desde donde se incrementan gradualmente, conforme se asciende topográficamente hacia el centro, mostrando de esta manera un comportamiento similar al de una isla. Los más profundos, de 2.0 a 2.5 m, se presentan en la región central, entre los poblados Las Cabras e Isla del Bosque en la región norte, y en las inmediaciones del poblado Los Ángeles, ubicado en la porción central (figura 4).

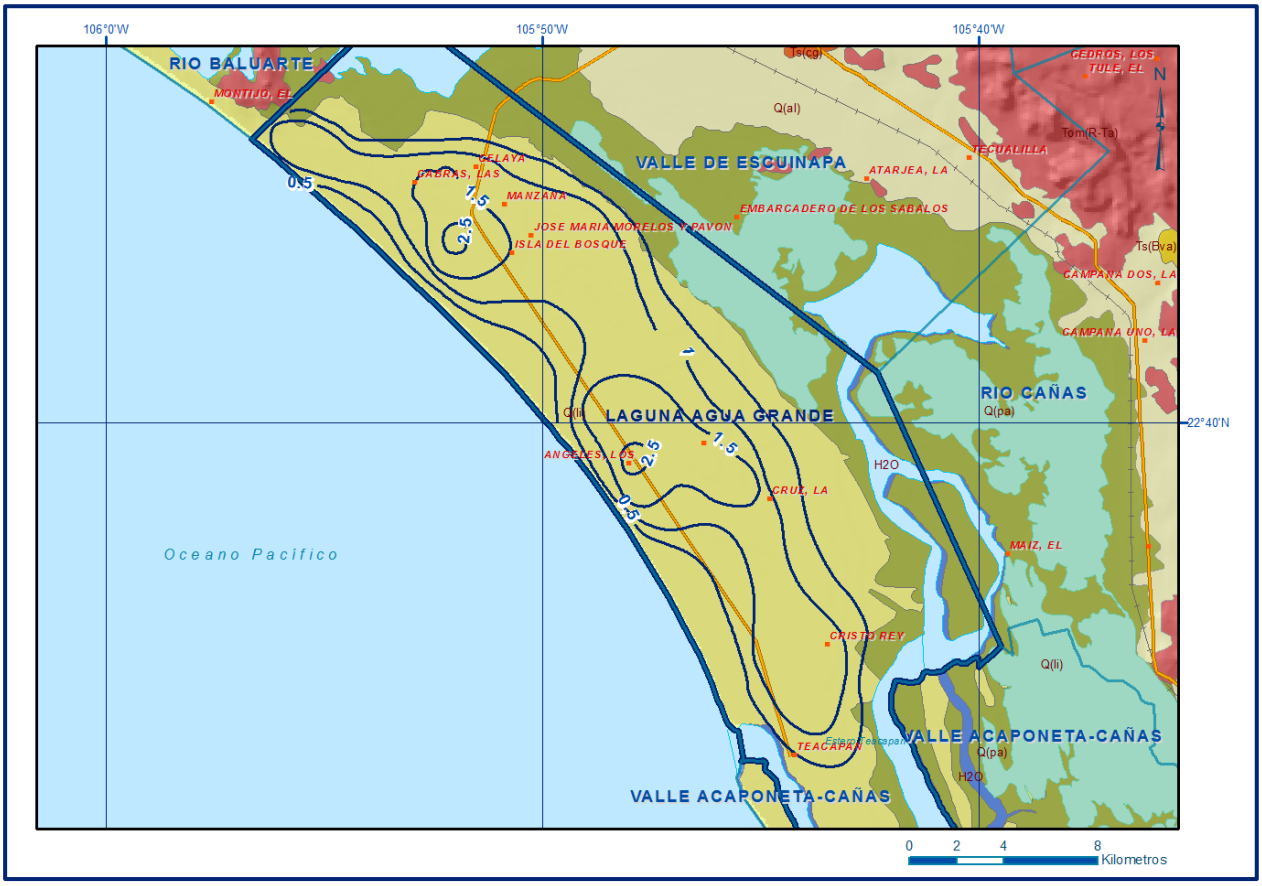


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2019)

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 0.5 a 2.5 msnm, que se incrementan de las zonas litorales marina y lagunar hacia la región central de la barra arenosa, mostrando un comportamiento típico de una isla, con las zonas de recarga ubicadas en esta porción del centro y con descargas subterráneas en flujo radial hacia los litorales (figura 5).

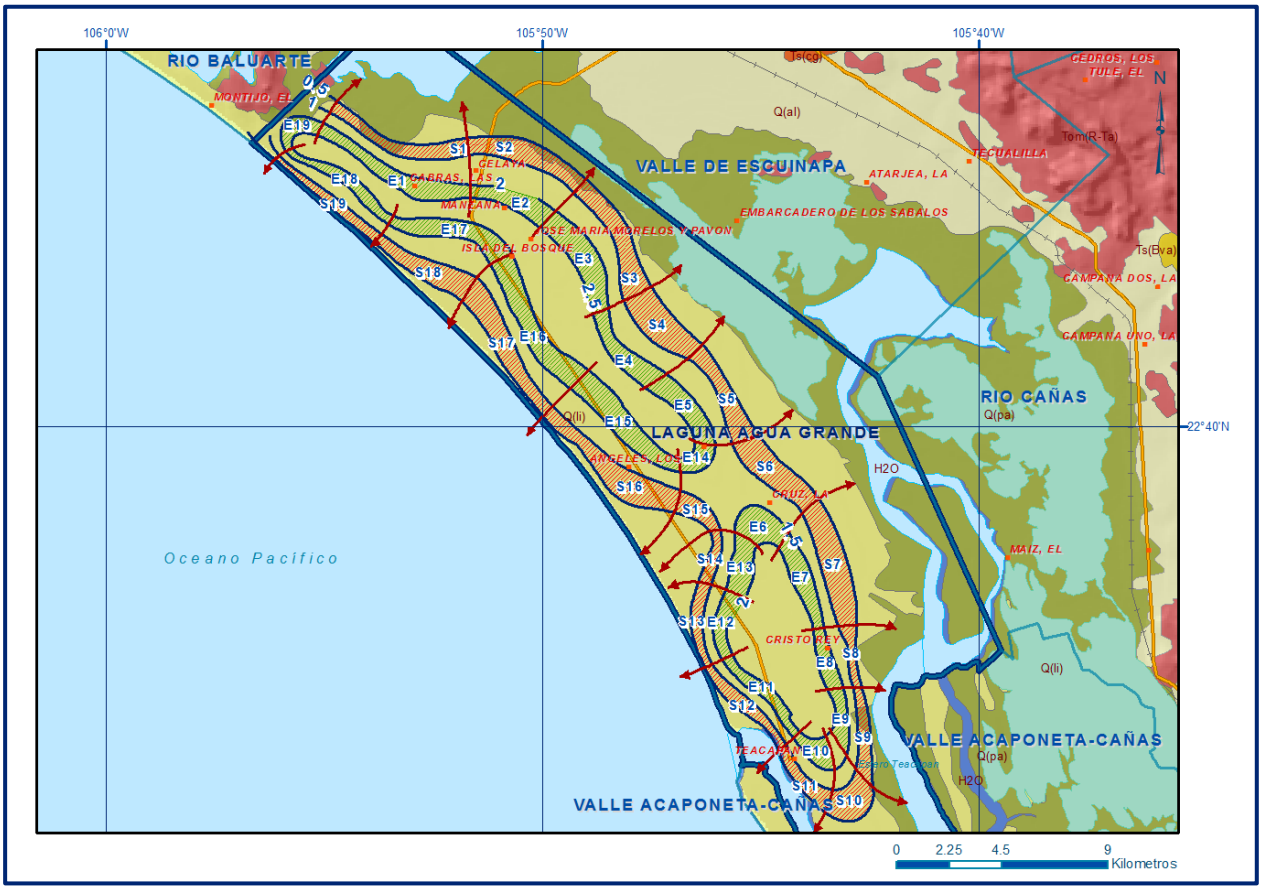


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2019)

5.4.3. Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2015-2019 registró valores de abatimiento y recuperación en la posición de los niveles del agua subterránea. Los abatimientos son de 0.5 a 1.0 m, es decir 0.1 a 0.3 m anuales, y se registran de manera local en las inmediaciones de los poblados Isla del Bosque, Los Ángeles y Cristo Rey; en tanto que las recuperaciones son de 0.5 m, 0.1 anuales, y se presentan en toda porción litoral de la barra arenosa. En la mayor parte de la superficie del acuífero no se registraron cambios en los niveles del agua subterránea (figura 6).

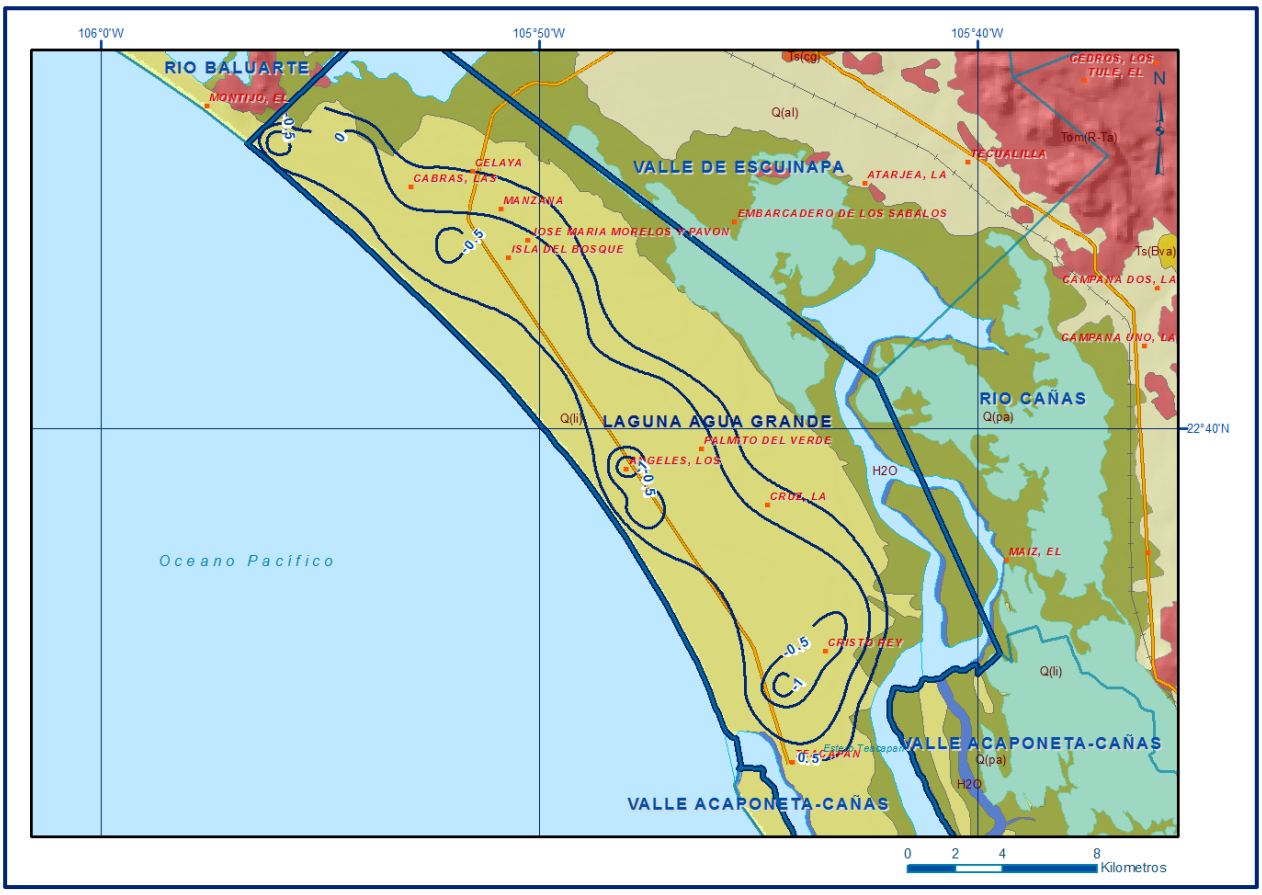


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2015-2019)

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 200 a 1302 ppm, solo una muestra sobrepasa 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 (7 muestras) se supera el LMP de manganeso, 1 en la concentración de fierro y 2 en sodio y cloruro.

Según con la clasificación establecida por la American Public Health Association (APHA, 1995), el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre ya que los valores de conductividad eléctrica varían de 214a 2600 μS/cm. Los valores de temperatura varían de 26.4 a 32.9 °C y los de pH de 6.3 a 8.5.

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), 1 de las muestras analizadas se clasifica C_1-S_1, que representa agua de baja salinidad con bajo contenido de sodio intercambiable; 2 muestras más como C_2-S_1, que representa agua de salinidad media con bajo contenido de sodio intercambiable; 5 muestras se clasifican como C_3-S_1, es decir alta salinidad y bajo contenido de sodio intercambiable 1 más como C_3-S_2 alta salinidad y contenido medio de sodio intercambiable, y 1 como C_4-S_1salinidad muy alta y bajo contenido de sodio intercambiable. Las 3 primeras muestras son aptas para la agricultura sin restricción alguna y las 7 muestras restantes 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-sódica, bicarbonatada-clorurada-sódica, bicarbonatada-clorurada-magnésica y bicarbonatada-cálcica-sódica que representan agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia y con influencia del agua marina.

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 1,050 aprovechamientos del agua subterránea, de los cuales 11 son norias, 1009 jagüeyes y 30 puntas; del total de obras, 1042 están activas y 8 inactivas. De acuerdo con su clasificación por usos, de las 1042obras activas, 877se utilizan en la agricultura, 163 para uso pecuario y 2 para uso doméstico. El volumen de extracción asciende a **73.6 hm^3 anuales**, de los cuales 73.0 hm^3 (99.2%) se destinan al uso agrícola y 0.6 hm^3 (0.8%) se utilizan para uso pecuario.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el periodo 2015-2019, en una superficie de **234 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:

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:

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). Para este caso, el volumen para uso público-urbano es muy pequeño por lo que sólo se considera la recarga incidental por retornos de riego agrícola.

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 (ΔVS) y para estimar las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la siguiente ecuación de balance:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical
Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
Ri: Recarga incidental
B:Bombeo
Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
ETR: Evapotranspiración real
ΔV(S): Cambio de almacenamiento

$$Rv = B + Sh + ETR - Eh - Ri \pm \Delta VS \quad (2)$$

7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

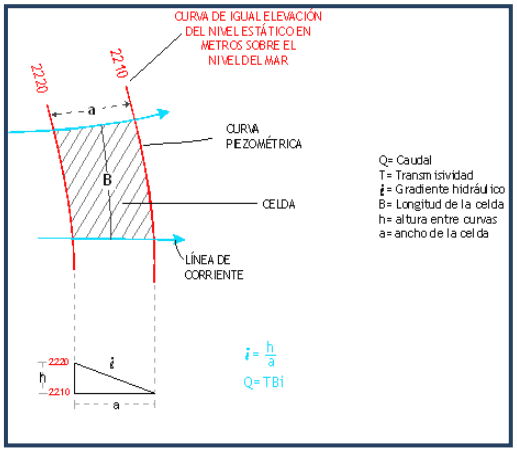
Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de 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 (m^3/s)
T: Transmisividad (m^2/s)
B: Longitud de la celda (m)
i: Gradiente Hidráulico (adimensional)



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 **23.9 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	6600	606	0.5	0.0008	0.0100	0.0545	1.7
E2	3314	722	0.5	0.0007	0.0100	0.0230	0.7
E3	4539	1032	0.5	0.0005	0.0100	0.0220	0.7
E4	3810	785	0.5	0.0006	0.0100	0.0243	0.8
E5	3383	853	0.5	0.0006	0.0100	0.0198	0.6
E6	1951	1320	0.5	0.0004	0.0250	0.0185	0.6
E7	3944	691	0.5	0.0007	0.0250	0.0713	2.2
E8	2621	643	0.5	0.0008	0.0250	0.0510	1.6
E9	2323	649	0.5	0.0008	0.0250	0.0447	1.4
E10	1704	1061	0.5	0.0005	0.0250	0.0201	0.6
E11	4326	441	0.5	0.0011	0.0250	0.1226	3.9
E12	2825	654	0.5	0.0008	0.0250	0.0540	1.7
E13	2382	876	0.5	0.0006	0.0250	0.0340	1.1
E14	1619	790	0.5	0.0006	0.0250	0.0256	0.8
E15	5444	948	0.5	0.0005	0.0100	0.0287	0.9
E16	6105	902	0.5	0.0006	0.0100	0.0338	1.1
E17	4926	750	0.5	0.0007	0.0100	0.0328	1.0
E18	5088	410	0.5	0.0012	0.0100	0.0620	2.0
E19	2176	717	0.5	0.0007	0.0100	0.0152	0.5
						TOTAL	23.9

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.

7.1.3 Recarga incidental(Rr)

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 40% 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 73.0 hm^3 al aplicar el 40% de retornos de riego, se obtiene un volumen de 29.2 hm^3 anuales. Por lo tanto, **Rr = 29.2 hm^3/año.**

7.2. Salidas

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

7.2.1. Bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **73.6 hm^3 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 **6.6 hm^3/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	5893	540	0.5	0.0009	0.0010	0.0055	0.2
S2	4956	996	0.5	0.0005	0.0010	0.0025	0.1
S3	5189	789	0.5	0.0006	0.0010	0.0033	0.1
S4	3366	1325	0.5	0.0004	0.0050	0.0064	0.2
S5	4261	740	0.5	0.0007	0.0050	0.0144	0.5
S6	3768	1083	0.5	0.0005	0.0050	0.0087	0.3
S7	5307	1036	0.5	0.0005	0.0050	0.0128	0.4
S8	2638	388	0.5	0.0013	0.0010	0.0034	0.1
S9	3834	534	0.5	0.0009	0.0010	0.0036	0.1
S10	2356	1186	0.5	0.0004	0.0050	0.0050	0.2
S11	3012	537	0.5	0.0009	0.0050	0.0140	0.4
S12	4554	554	0.5	0.0009	0.0050	0.0206	0.6
S13	3654	493	0.5	0.0010	0.0050	0.0185	0.6
S14	2350	476	0.5	0.0011	0.0050	0.0123	0.4
S15	3554	981	0.5	0.0005	0.0050	0.0091	0.3
S16	1959	720	0.5	0.0007	0.0050	0.0068	0.2
S17	6089	830	0.5	0.0006	0.0050	0.0183	0.6
S18	4194	878	0.5	0.0006	0.0050	0.0119	0.4
S19	5252	458	0.5	0.0011	0.0050	0.0287	0.9
						TOTAL	6.6

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.

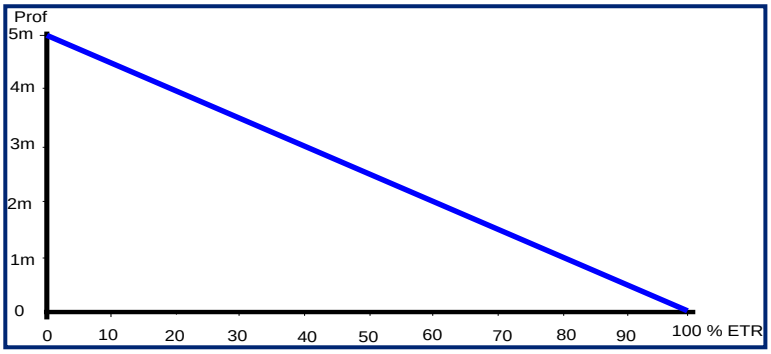
Para la obtención de este parámetro se utilizó la ecuación empírica de Turc, considerando los valores promedio anual de temperatura y precipitación de 25.8 °C y 976.5 mm, representativos de la superficie del acuífero. Con ellos se obtiene una lámina de evapotranspiración de 894.0 mm anuales, como se 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) =	25.8		
P(mm) =	976.5	P^2 =	953552.25
L =	1803.6756	L^2 =	3253245.67
ETR (mm)	894.0		

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 =101.9 hm³/año.**

Tabla 4. Cálculo de la evapotranspiración (2019)

RANGOS DE PROFUNDIDAD (m)	PROFUNDIDAD MEDIA (m)	ÁREA (km^2)	LÁMINA ETR (m)	PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EXTINCIÓN DE LA ETR (m)	% ETR	VOLUMEN ETR (hm^3/año)
1.5 a 2.5	2	29.0	0.8940	5	0.6	15.6
2.5	2.5	1.8	0.8940	5	0.5	0.8
1 a 1.5	1.25	80.1	0.8940	5	0.75	53.7
0.5 a 1.0	0.75	41.9	0.8940	5	0.85	31.8
	Total	**152.8**				**101.9**

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 2015-2019 que se muestra en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico Sy = 0.2, se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = A * h * S$$

Donde:

ΔVS: 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 -3.0 hm^3**,** es decir, un promedio anual de -0.8 hm^3. Por lo tanto, **ΔV(S) = -0.8 hm^3anuales.**

Tabla 5. Cálculo del cambio de almacenamiento (2015-2019)

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km^2)	Sy	ΔV(S) (hm^3/año)
-0.5	-0.5	2.0	0.2	-0.2
-1	-1	1.0	0.2	-0.2
-0.5 a -1	-0.75	10.1	0.2	-1.5
0 a -0.5	-0.25	102.1	0.2	-5.1
0.5	0.5	40.0	0.2	4.0
	TOTAL	**155.3**	**TOTAL**	**-3.0**
	Promedio anual			**-0.8**

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:

$$Rv = B + Sh + ETR - Eh - Rr \pm \Delta VS$$
$$Rv = 73.6 + 6.6 + 101.9 - 23.9 - 29.2 - 0.8$$
$$Rv = 128.2\ hm^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = Rv + Eh + Rr$$
$$R = 128.2 + 23.9 + 29.2$$
$$R = 181.3\ hm^3 \text{ anuales}$$

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:

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

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

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como incidental. Para este caso su valor es **181.3 hm^3/año**, de los cuales 152.1 hm^3 son recarga natural y 29.2 hm^3 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 Laguna Agua Grande, su valor es **108.5 hm^3 anuales**, de los cuales 6.6 hm^3corresponden a las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el mar para mantener la posición de la interfase marina y de las marismas, y 101.9 hm^3 a la descarga por evapotranspiración. **DNC = 108.5 hm^3 anuales.**

8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **66,154,945 m^3 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.

DMA = R – DNC – VEAS
DMA = 181.3 – 108.5 – 66.154945
DMA = 6.645055 hm^3/año

El resultado indica que existe un volumen disponible de **6,645,055 m^3** para otorgar nuevas concesiones.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2005. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Laguna Agua Grande, 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. Realizado 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 Laguna Agua Grande, estado de Sinaloa.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Evaluación de acuíferos en la zona Elota-Cañas en el estado de Sinaloa. Realizado por Consultores, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1978. Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de Escuinapa, estado de Sinaloa. Realizado por Estudios Geológicos y Obras Civiles, S.A. (EGEOCISA)

Servicio Geológico Mexicano, 1999, Carta Geológica-Minera F13-5 “Escuinapa”, escala 1: 250,000.

Servicio Geológico Mexicano, 2015, Carta Geológica-Minera F13-A67 “Teacapan”, escala 1: 50,000.