

SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO MANEADERO (0212), ESTADO DE BAJA
CALIFORNIA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1 Localización	2
1.2 Situación administrativa del acuífero	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	8
3.1 Provincia fisiográfica	8
3.2 Clima	9
3.3 Hidrografía.....	10
3.4 Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA.....	12
4.1 Estratigrafía	15
4.2 Geología estructural	21
4.3 Geología del subsuelo.....	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	22
5.1 Tipo de acuífero.....	22
5.2 Parámetros hidráulicos	24
5.3 Piezometría.....	24
5.4 Comportamiento hidráulico.....	24
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	24
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	25
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	26
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	27
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	31
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	31
7.1 Entradas.....	31
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	32
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	32
7.1.3 Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (Ehs).....	34
7.2 Salidas	34
7.1.1 Extracción por bombeo (B).....	34
7.1.2 Salidas de agua salobre (Ssb)	34
7.2 Cambio de almacenamiento $\Delta V(S)$	34
8. DISPONIBILIDAD	36
8.1 Recarga total media anual (R).....	36
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	36
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	37
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	37
9. BIBLIOGRAFÍA	38

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 Maneadero, definido con la clave 0212 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza geográficamente en la porción noroccidental del estado de Baja California, entre los paralelos 31°33' y 31° 54' de latitud norte y los meridianos 116°00' y 116° 45' de longitud oeste, cubre una superficie aproximada de 1,466 km².

Limita al norte con los acuíferos Ensenada y Ojos Negros; al este con el acuífero San Vicente; al sur con el acuífero Santo Tomás; al oeste su límite es el Océano Pacífico (figura 1).

Geopolíticamente, la superficie completa del territorio del acuífero se localiza en el municipio de Ensenada.

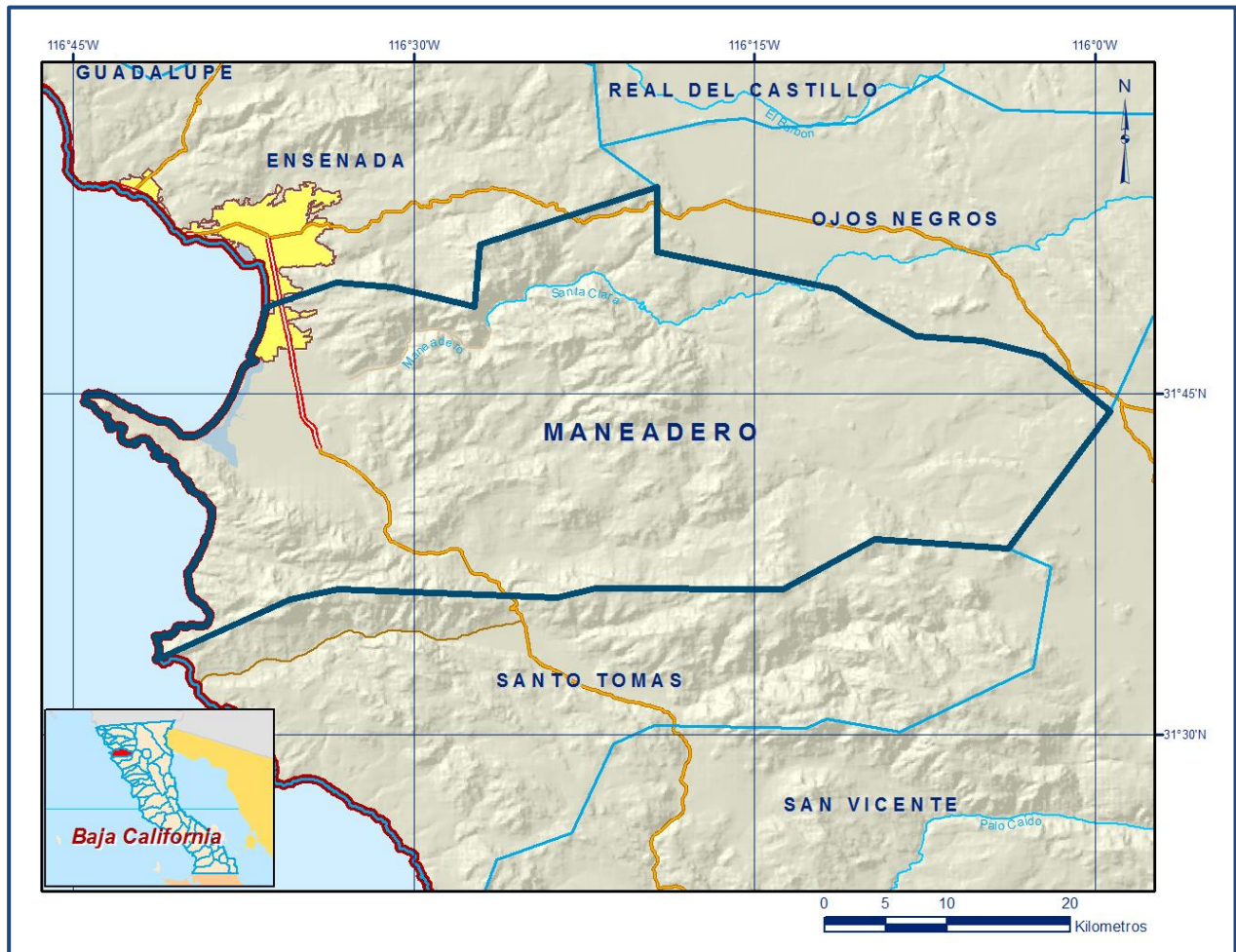


Figura 1. Localización del acuífero

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 del acuífero

ACUIFERO 0212 MANEADERO							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	116	19	16.0	31	51	14.7	
2	116	11	24.4	31	49	38.3	
3	116	9	55.9	31	48	40.2	
4	116	7	51.5	31	47	33.8	
5	116	4	54.4	31	47	20.0	
6	116	2	16.8	31	46	41.2	
7	115	59	19.5	31	44	14.4	
8	116	3	48.6	31	38	11.6	
9	116	9	40.4	31	38	35.7	
10	116	13	42.7	31	36	24.2	
11	116	21	57.8	31	36	24.9	
12	116	23	42.7	31	36	12	
13	116	33	20.7	31	36	23.6	
14	116	35	27.2	31	35	55.3	
15	116	41	21.3	31	33	17.3	DEL 15 AL 16 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
16	116	36	33.0	31	48	48.3	
17	116	33	24.7	31	49	53.7	
18	116	30	56.2	31	49	43.4	
19	116	27	20.3	31	48	52.1	
20	116	27	6.0	31	51	34.6	
21	116	19	15.9	31	54	7.8	
1	116	19	16.0	31	51	14.7	

1.2 Situación administrativa del acuífero

El acuífero Maneadero pertenece al Organismo de Cuenca I “Península de Baja California”. Su territorio se encuentra completamente vedado y sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 15 de mayo de 1965; esta veda se clasifica como tipo III en las que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos de Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En el territorio del acuífero no se localiza ninguna unidad o Distrito de Riego.

Los usuarios de aguas subterráneas se encuentran organizados en el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Acuífero Maneadero, A.C., instalado el 28 de octubre de 1999 y forma parte del Consejo de Cuenca Baja California, instalado el 7 de diciembre de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que comprende el acuífero se han realizado diversos estudios hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y de otros tipos, algunos de cobertura regional. A continuación se mencionan los estudios más recientes e importantes:

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL VALLE DE MANEADERO, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA NORTE. Elaborado por la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. de C.V., para la Secretaría de Recursos Hídricos, en 1974.

El estudio tuvo como objetivo principal determinar la condición actual del acuífero y definir su potencialidad, así como establecer las acciones necesarias que deben emprenderse para preservar las reservas almacenadas.

Entre sus actividades principales destacan el censo e hidrometría, nivelación de brocales, piezometría, recolección de muestras para análisis fisicoquímicos, realización de pruebas de bombeo, exploraciones geofísicas y recorridos hidrogeológicos. Sus resultados manifestaron que el acuífero se encontraba en serio peligro de contaminación debido al alarmante incremento de la extracción que causó su sobreexplotación y la intrusión marina, pronosticando una vida útil muy corta de continuar con este ritmo de extracción. Debido a la sobreexplotación, a la mala calidad del agua y a la intrusión marina, recomienda sustituir la fuente de abastecimiento a la ciudad de Ensenada y trasladarla al acuífero Real del Castillo; el tratamiento de las aguas residuales de Ensenada que se utilizaban para riego en la salida del Arroyo San Carlos y disminuir el volumen de agua para uso agrícola, mediante la tecnificación y la elección de cultivos de mayor rendimiento económico.

RECONNAISSANCE GEOLOGY OF DE STATE OF BAJA CALIFORNIA. Elaborado por Gordon Gastil, Richard P. Philips y Edwin C. Allison en 1975. Como resultado se obtuvo un plano geológico a escala 1:250,000, que divide la geología histórica en los siguientes eventos: prebatolítico; emplazamiento en rocas batolíticas, con sus cuatro zonas metamórficas.

Estructuralmente clasifica a Baja California en península oriental y central estable; litoral continental inestable y depresión del Golfo.

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD HIDROLÓGICA EN SAN QUINTÍN Y MANEADERO, B.C.N
Elaborado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en 1978. En dicho estudio se menciona que debido a la escasez de agua en zonas aledañas, diversas empresas agrícolas migraron a estas zona, lo que ha provocado en los últimos años el incremento en la construcción de obras con la consecuente reducción en la disponibilidad del agua subterránea; lo anterior trajo como consecuencia el deterioro de la calidad del agua que se extrae en las obras cercanas a la costa debido al avance de la intrusión marina.

POLÍTICAS DE OPERACIÓN DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MANEADERO, BAJA CALIFORNIA NORTE. **Elaborado por la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua en 1994.** Este trabajo tuvo como objetivo administrar con eficiencia los recursos hidráulicos del acuífero de acuerdo con los requerimientos de los usuarios y las posibilidades de abastecimiento.

Mediante un modelo matemático de simulación del flujo subterráneo representa las condiciones geohidrológicas del acuífero y luego desarrolla un modelo de manejo que permita diseñar una política óptima de explotación.

ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO BC.12 MANEADERO, B.C.
Elaborado por la Gerencia Regional Península de Baja California de la Comisión Nacional del Agua en 1998. Su objetivo fue definir el modelo actual de funcionamiento del acuífero, conocer el grado actual de explotación y aportar soluciones alternativas para encontrar el nivel de equilibrio. Concluye que la principal recarga que recibe el acuífero es aportada por el flujo subterráneo proveniente de los Arroyos San Carlos y las Ánimas-San Francisquito.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL VALLE DE MANEADERO, B.C.
Elaborado por la Comisión Federal de Electricidad para la Comisión Nacional del Agua en 1999. El objetivo de este estudio fue determinar la factibilidad de extracción de 500 lps de agua salada en el Valle de Maneadero.

Mediante la realización de 40 sondeos eléctricos verticales hasta una profundidad de 50 m, perforación de 3 pozos exploratorios a 41 m de profundidad, la ejecución de 2 pruebas de bombeo y la medición de conductividad eléctrica, concluye que es posible extraer 500 lps de agua salada con conductividad eléctrica de entre 10,000 a 15,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO MANEADERO, BAJA CALIFORNIA NORTE. Elaborado por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 1999. Mediante la construcción del modelo de simulación y el diseño de una red piezométrica de monitoreo, proporciona una sistema de análisis predictivo para evaluar el impacto de diferentes políticas de operación y acciones sobre el acuífero en los próximos año.

Concluye que la estabilización del acuífero a largo plazo depende de no incrementar la extracción para Ensenada, así como de la reducción gradual hasta en un 50% de las extracciones para uso agrícola e industrial con respecto a los 18 hm^3 extraídos para dicho fin en 1998.

Mediante un total de 43 captaciones de agua subterránea, es posible representar la configuración del nivel estático del acuífero y continuar con el análisis de sus tendencias.

PLAN DE MANEJO INTEGRADO DEL AGUA PARA EL ACUÍFERO MANEADERO, BAJA CALIFORNIA NORTE. Elaborado por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 2002. Debido a la sobreexplotación del acuífero, la intrusión marina y la reducción de la productividad agrícola se plantea el establecimiento de un plan de manejo estratégico en el que se establezcan las soluciones para su manejo sustentable.

Propone, mediante la organización de los usuarios, una serie de acciones que permitan desarrollar políticas de operación para proteger la sustentabilidad de los recursos naturales y evitar continuar con la sobreexplotación del acuífero. Las acciones para proteger al acuífero y los derechos de los usuarios, dependen de las estrategias definidas, de su ejecución, evaluación y seguimiento.

ESTUDIO DE GEOQUÍMICA EN EL ACUÍFERO MANEADERO, MUNICIPIO DE ENSENADA, B.C. Elaborado por el Organismo de Cuenca Península de Baja California en 2009. Trata de reactivar y complementar una red de monitoreo simplificada y confiable para la obtención de información hidrogeoquímica del acuífero. Evalúa las condiciones fisicoquímicas del acuífero y obtiene planos de configuración pH, CE y de concentración de STD, Ca, Na, Mg, K y Cl. Actualizan la clasificación del agua de acuerdo al diagrama de Piper y al nomograma de Wilcox.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LOS ACUÍFEROS PARA ACTUALIZAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA DE 10 ACUÍFEROS, EN EL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA. Elaborado por Moro Ingeniería, S.C. para la Comisión Nacional del Agua en 2013. Los acuíferos estudiados son Tijuana, Tecate, Las Palmas, Ojos Negros, Laguna Salada, Maneadero, La Trinidad, Camalú, San Quintín y San Simón. El estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, revisar el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico, recabar información para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

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 actualizar el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de las provincias fisiográficas realizada por INEGI (1997), la superficie del acuífero se encuentra ubicada dentro de la Provincia Fisiográfica Península de Baja California, Subprovincia Sierras de Baja California Norte, la cual está representada en todo su conjunto por la provincia geológica Batolito de Juárez-San Pedro Mártir, de origen intrusivo, edad mesozoica y evolución geológica de raíz de arco volcánico, asociada a la subducción de la extinta placa tectónica de Farallón (Ortega *et al.*, 1992).

La mejor exposición de esta subprovincia está representada por las sierras Juárez, San Felipe y San Pedro Mártir. Esta última, con una elevación máxima de 3,078 msnm en el cerro Pico del Diablo. Se reconoce una gran variedad de tipos litológicos, estructuras y geoformas del relieve. Esta provincia está caracterizada por la presencia de tres cinturones pre-terciarios a lo largo de toda la península.

La fisiografía de la cuenca está representada por dos expresiones morfológicas principales: una constituida por altas prominencias topográficas de la ladera occidental de la Sierra de Juárez y la alta escarpada pared de su cierre hidrográfico sur, formada por rocas volcánicas, intrusivas y metamórficas, en tanto que la pared sur está constituida por rocas sedimentarias.

Ambos rasgos son el resultado de intensos movimientos tectónicos producidos por la acción de fallas transversales al área peninsular, entre las que destaca la falla Agua Blanca.

3.2 Clima

Con base en la clasificación y distribución de climas del INEGI (1998) y de acuerdo con los criterios de la clasificación de Köppen modificados para las condiciones de la República Mexicana por E. García, se determina que en la superficie que cubre el acuífero predomina el clima tipo BSk que pertenece al grupo de climas semisecos, subtipo templado mediterráneo, con régimen de lluvias invernales, algo extremos, que se registran principalmente de octubre a marzo.

Presenta abundante humedad en la costa durante estos meses y seco prácticamente en el resto de la zona, verano fresco con nieblas frecuentes. También se presenta el clima templado (Cs), subtipo húmedo, régimen de lluvias invernales y verano fresco a cálido algo extremo.

Para la determinación de las variables climatológicas, se utilizó la información de dos estaciones: Maneadero y Ojos Negros, que tienen un registro que comprende el periodo 1977-2010 y 1948-1996, respectivamente. Con base en esta información se determinó que los valores promedio anuales de temperatura y precipitación son **16.8 °C y 231.5 mm**, respectivamente. Con respecto a la evaporación potencial, su valor promedio anual es de **200 mm**.

El régimen de lluvias se registra principalmente de noviembre a abril, con valores que varían de 175 mm en el valle a 500 mm en las sierras; el máximo valor se presenta en enero y julio es el mes más seco. Las temperaturas mínimas se registran entre los meses de diciembre a febrero. La región se caracteriza por presentar periodos prolongados de sequía, que eventualmente son interrumpidos por la incidencia de lluvias torrenciales. Aunque el valor de la precipitación pluvial media anual es muy bajo, las lluvias de temporada y la presencia ocasional de lluvias extraordinarias, tienen un efecto importante sobre la recarga al acuífero.

Las condiciones de aridez, causadas por las bajas precipitaciones pluviales, son agravadas por la presencia de sequías extremas que ocasionan una disminución de los escurrimientos superficiales y del almacenamiento.

3.3 Hidrografía

La zona de estudio se ubica en la Región Hidrológica No.1, Baja California Noroeste (Ensenada), Subregión Hidrológica Río Tijuana, en las cuencas Río Tijuana-Arroyo Maneadero y Arroyo Las Ánimas-Santo Domingo, subcuencas Arroyo Maneadero y Arroyo Las Ánimas. Esta región forma parte de la vertiente del Océano Pacífico. Sus drenes principales son el Arroyo San Carlos al norte y el Arroyo San Francisquito al sur. El Arroyo San Carlos se origina en la Sierra de Juárez a una altitud de 1863 msnm, su curso general es este-oeste, a lo largo de una subcuenca muy alargada de ancho promedio de 12 km aproximadamente, por lo que los afluentes son escasos y de corto recorrido.

Sus escurrimientos son medidos en la estación hidrométrica “San Carlos”, localizada a 20 km aguas arriba de la desembocadura, que ocurre en la Bahía de Todos Santos, ubicada a 12 km al sur de Ensenada. El área drenada hasta la estación hidrométrica es de 685 km² y hasta su desembocadura es de 815 km². Únicamente cuando ocurren grandes avenidas, el arroyo escurre hasta el valle donde se infiltra. El Arroyo San Francisquito tiene una trayectoria general de escurrimientos, sensiblemente paralela a la del arroyo San Carlos. Su recorrido a lo largo del cauce principal es de 75 km aproximadamente y drena una superficie total de 980 km². Su desembocadura ocurre también en la Bahía de Todos Santos, a 6 km al oeste de Maneadero. En esta corriente no se han hecho observaciones hidrométricas.

3.4 Geomorfología

Las condiciones climáticas del área, precipitación pluvial escasa y torrencial y pendiente alta de los cauces, baja permeabilidad de las unidades geológicas que limitan el acuífero y la alta evaporación, han contribuido a que el área se encuentre en una etapa de juventud del ciclo geomorfológico. La región se caracteriza por estar conformada por una planicie costera alargada en sentido norte-sur rodeada de mesetas y sierras altas hacia el este. En la superficie del acuífero se identifican tres geoformas.

Valle o Llanura Costera. Cubre aproximadamente el 4% de la superficie total del acuífero, es un valle homogéneo con orientación E-W inclinado hacia el W. Su pendiente no excede los 5° y se encuentra a una altitud comprendida entre los 0 y 100 msnm.

Está constituido por depósitos granulares de textura y tamaño variables; sus corrientes principales son los ríos arroyos San Carlos, ubicado al norte, y San Francisquito al sur, cuyos cauces están orientados en dirección preferencial este-oeste y constituyen las principales zonas de recarga al acuífero. El drenaje en esta unidad es de tipo subparalelo y paralelo.

Lomeríos y Mesetas. Se presentan en una franja orientada de manera paralela a la costa. Están constituidas por basaltos, areniscas y conglomerados.

Su elevación varía entre 100 y 300 msnm y en general presentan un sistema de drenaje de tipo paralelo, debido a que las mesetas se encuentran disectadas por cañones y cañadas.

Las unidades que las conforman tienen permeabilidad media a baja debido a que su composición litológica incluye arenas arcillosas, así como depósitos de talud y abanicos aluviales, localizados al pie de las montañas.

Sierras y Cerros. Se ubican en las porciones centro y oriental del acuífero, cubriendo aproximadamente el 90 % de su superficie, con una orientación preferencial hacia el NE en la porción central y E-W en el extremo sur. Las zonas topográficamente más altas forman parte de la Sierra de Juárez, localizada fuera de los límites del acuífero.

Están conformadas por rocas ígneas intrusivas (granitos, dioritas, tonalitas y granodioritas), como en el caso de los cerros Pedregoso y Prieto, y metamórficas (sierras El Encino Solo y Peralta), en las que el patrón de fallas y fracturas permite la infiltración de las lluvias. El drenaje que predomina es de tipo subdendrítico y subparalelo. Su altura varía de 400 a 1 400 msnm.

4. GEOLOGÍA

Desde el punto de vista geológico, la región se ubica en el Batolito de San Pedro Mártir (Ortega, *et. al.* 1992), de edad Mesozoica, de origen plutónico y de un ambiente de raíz de arco. Este intrusivo, conformado por tonalitas y granodioritas, se desarrolló del Cretácico al Cenozoico tardío y tiene una extensión de más de 400 km².

La intrusión causó metamorfismo a las rocas prebatolíticas, transformándolas a gneis y esquisto. El fallamiento fuertemente escalonado que presenta la península de Baja California está relacionado con el desarrollo de los sistemas transformantes que dominan la tectónica regional.

La geología regional es el reflejo de una zonificación litológica-estructural que se manifiesta a lo largo de toda la península de Baja California. En el territorio del Estado de Baja California se encuentra expuesta una secuencia estratigráfica cuyo rango geocronológico varía desde el Paleozoico hasta el Reciente.

La distribución de las diferentes unidades litológicas se puede definir según tres cinturones pre-terciarios que presentan características petrográficas, estructurales y estratigráficas claramente diferenciables. Estos cinturones se encuentran cubiertos de manera independiente por depósitos volcánicos y sedimentarios del Terciario y Cuaternario; su distribución de oeste a este es la siguiente:

El primer cinturón, ubicado en el extremo occidental de la península, está representado por una secuencia de sedimentos marinos y continentales del Cretácico Superior, poco consolidados y sin fuertes deformaciones tectónicas. Esta secuencia fue definida formalmente por Beal (1948) como Formación Rosario y consiste de areniscas, limolitas, lutitas y conglomerados, que contienen tanto fauna marina como huesos de saurios.

En el área del acuífero afloran rocas sedimentarias, ígneas y metasedimentarias cuyo registro estratigráfico varía del Mesozoico (Triásico) al Reciente (figura 2)

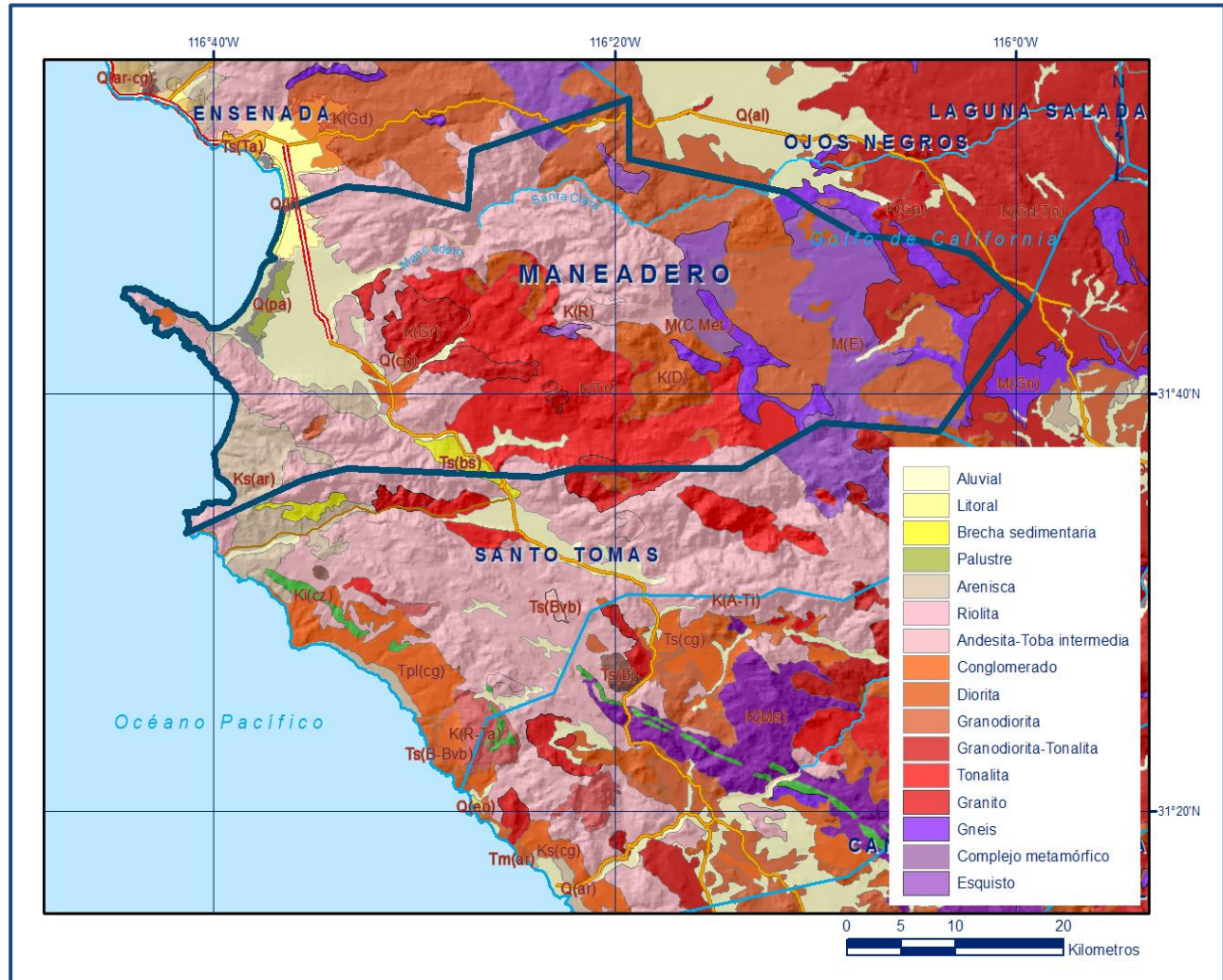


Figura 2. Geología general del acuífero

El siguiente cinturón está conformado por secuencias de rocas volcánicas, vulcanoclásticas y sedimentarias cuya edad asignada corresponde al Cretácico Inferior. La secuencia superior y de mayor distribución fue definida originalmente por Santillán y Barrera (1930), en INEGI (1984), como Formación Alisitos, que está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada y afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península.

El tercer cinturón, ubicado en el borde oriental de la porción norte de la península, está constituido por rocas intrusivas y metamórficas producto del metamorfismo regional de rocas sedimentarias. A esta franja pertenecen los batolitos mesozoicos (tonalitas-granodioritas y granitos) y rocas prebatolíticas anteriores a la Formación Alisitos, cuya edad no ha sido aún bien definida.

Las secuencias metamórficas prebatolíticas asociadas a este cinturón presentan diferentes facies metamórficas y su edad es motivo de discusión. Predominan los esquistos, gneises, cuarcitas y pizarras. La historia cenozoica está caracterizada por la acumulación de gruesos espesores de sedimentos continentales que afloran en diversas localidades, por el desarrollo de depósitos marinos, sobre todo en el borde occidental de la península, y por una importante actividad volcánica que cubre parcialmente los cinturones mesozoicos descritos.

Durante el Plioceno y Pleistoceno se acumularon depósitos marinos en una serie de terrazas que alcanzan una altura de hasta 500 m, asociadas a cambios glaciales del nivel del mar (Gastil et al., op. cit.), que se desarrollaron en el marco de una serie de levantamientos y basculamientos de las zonas costeras durante el Plioceno-Cuaternario (Ortlieb, 1978). Tierra adentro se presentan depósitos aluviales, eólicos y lacustres, cuya acumulación ocurre en la actualidad.

Regionalmente la zona está representada por un marco geológico que ha sido definido por la sucesión de eventos tectónicos relacionados con la evolución del borde occidental de Norteamérica, así como con los fenómenos que contribuyeron a la separación de la Península de Baja California.

El panorama morfoestructural que presenta hoy la región ha sido establecido por eventos geológicos que datan desde la Era Paleozoica y culminan con la apertura del Golfo de California, dominado por un ambiente de “Rifting”, con fallamiento transforme.

Las unidades litológicas que afloran pertenecen a dos terrenos tectonoestratigráficos: El Terreno Cortés y el Terreno Alisitos. El primero se distribuye en la porción oriental y el segundo en la región occidental. Las rocas en general se encuentran moderadamente fracturadas y cizalladas.

4.1 Estratigrafía

En la porción occidental del acuífero afloran rocas ígneas intrusivas como granitos y granodioritas, consideradas parte de la Franja Batolítica Transpeninsular, a la cual se le atribuye una edad Cretácico Superior. Sobre estas rocas sobreyace una serie de derrames de composición basáltica y un grupo de rocas andesíticas. A continuación se hace una breve descripción de las unidades geológicas que afloran en el área, de la más antigua a la más reciente:

Mesozoico

Triásico-Jurásico

Las rocas más antiguas están representadas por metasedimentos y una alternancia de esquistos y gneises de posible edad Triásico Superior-Jurásico Medio que afloran como techos colgantes en rocas graníticas. Aflora también una secuencia compuesta por andesitas, brechas andesíticas y rocas metavolcánicas con bajo grado de metamorfismo en facies de esquistos verdes.

Aunque esta unidad no contiene depósitos de calizas, se correlaciona litológicamente con parte de la Formación Santiago Peak, que aflora desde las montañas de Santa Ana en el sur de California hasta la Falla Agua Blanca en Baja California.

Cretácico

Formación Alisitos (Cretácico Inferior)

Fue definida formalmente por Santillán y Barrera (1930), al referirse a *“una secuencia de 200 m de lutitas y areniscas metamorfoseadas del Cretácico Inferior que aflora en el Rancho Alisitos en el Valle de Santo Tomás, en el Estado de Baja California.*

Esta unidad se extiende en una franja orientada NW-SE por espacio de 500 km de largo y 50 km de ancho (Almazán, 1988), a lo largo de la cual, debido a su naturaleza, presenta frecuentes variaciones horizontales”.

Consta de nueve miembros litológicos: dos inferiores de composición volcánica, tres intermedios de rocas sedimentarias con fauna fósil del Albiano Medio o Aptiano y cuatro superiores de clásticos gruesos de origen volcánico que se localizan al este-noreste de El Rosario, Baja California que se considera la sección más completa (López, 1980).

Los miembros volcánicos constan de rocas piroclásticas y lávicas de composición dacítico-andesítica. De acuerdo con Rangin (1978) en INEGI (1984), la Formación Alisitos constituye un cinturón volcánico-sedimentario desarrollado en la parte noroccidental del país en forma paralela con otro en Sonora, evolucionando ambos sobre corteza continental.

Estos cinturones han sido relacionados a la subducción y fusión parcial asociadas a uno o más límites convergentes desarrollados en el noroeste de México durante la apertura del Océano Atlántico y el movimiento de Norteamérica hacia el noroeste.

Está constituida principalmente por rocas piroclásticas y lavas de composición dacítica-andesítica, por cuerpos de caliza arrecifal con fósiles del Aptiano y Albiano, así como rocas clásticas derivadas de rocas volcánicas.

En algunas localidades, cubre discordantemente a rocas volcánicas y sedimentarias de edad triásica y jurásica; se encuentra deformada, parcialmente metamorfozada en facies de esquistos verdes, afectada por numerosas fallas y por el emplazamiento de cuerpos intrusivos graníticos del Cretácico. Subyace discordantemente a la Formación Rosario y se extiende persistentemente a lo largo de toda la porción norte de la península. Aflora coronando a las rocas de edad Triásico-Jurásico, en forma discordante.

Rocas ígneas Intrusivas. Las rocas plutónicas que conforman los batolitos varían en composición mineralógica desde tonalitas hasta granodioritas y granitos; sin embargo, en algunas localidades se han cartografiado pequeños intrusivos de diorita y gabro. Los cuerpos plutónicos varían en edad de W a E, desde cretácicos en Baja California hasta cenozoicos en Chihuahua (Gastil y Krummenacher, 1978; Silver y Anderson, 1978). La mayor parte de estos emplazamientos batolíticos ocurrieron durante y después de los depósitos y emisiones magmáticas que dieron origen a la Formación Alisitos.

Se considera que las rocas pertenecen al cinturón orogénico denominado Cordillera Norteamericana, que se estableció durante el Mesozoico. Esta unidad se presenta intrusionando a la secuencia vulcanosedimentaria de la Formación Alisitos y junto con dicha unidad, conforman las partes más elevadas de la región. Sus afloramientos muestran una estructura masiva, están fuertemente fracturadas y su intemperismo es en forma de bloques.

Formación Rosario (Cretácico Superior)

Su nombre fue designado formalmente por Beal en 1948 (en López, R., 1985), para referirse a un afloramiento de areniscas de color café y arcillas de color oscuro, con lentes de conglomerado, asignándole una edad Campaniano-Maestrichtiano. Su localidad tipo se encuentra en el Arroyo Rosario, ubicado al noreste del poblado del mismo nombre. Está formada por paquetes de lutitas, areniscas y conglomerados con presencia de fósiles de origen continental y marino; se presenta poco consolidada y con escasas evidencias de tectonismo. Se encuentra descansando en discordancia angular sobre la Formación Alisitos, formando el tercer cinturón (postbatolítico) de los terrenos pre-terciarios de Baja California Norte, cuyo límite oriental es la denominada línea “Santillán-Barrera” que representa una línea de costa fluctuante que marca el límite de dos eventos tectónicos.

De acuerdo con Yeo (1984), la Formación Rosario se divide en tres miembros litoestratigráficamente distintos, cada uno de los cuales corresponde a una fase diferente en el cambio del nivel del mar. Estas unidades son (de la base a la cima): (a) miembro arenoso inferior, (b) miembro lodolítico medio y (c) miembro conglomerático-arenoso superior. Los tres presentan marcados cambios en facies tanto en extensión (de norte a sur y de este a oeste) como en la vertical (en sentido estratigráfico).

La transición vertical de estas facies corresponde a variaciones temporales del nivel del mar. En términos geográficos los cambios de facies más grandes se presentaban de este a oeste, que concuerdan con el trend de la línea de costa hacia la cuenca para el Cretácico Tardío.

Esta formación cubre, en discordancia angular, a rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias más antiguas; subyace a rocas volcánicas del Cuaternario y a sedimentos continentales y marinos del Neógeno y Cuaternario.

Las determinaciones paleontológicas la ubican estratigráficamente en los pisos Campaniano y Maestrichtiano. Su espesor máximo es de 750 m. Se correlaciona con las formaciones Point Loma y Cabrillo del área de San Diego.

Terciario (Neógeno)

Formación Rosarito Beach

Representa el depósito en la cuenca Rosarito Beach formada en el Mioceno Medio, divide en dos subcuencas: Tijuana y la Misión (Ashby y Minch, 1988 y Ashby, 1989) y subdividida en diez miembros: cinco se localizan en la subcuenca Tijuana y cinco en La Misión (Ashby, 1989). Los cinco miembros de la Subcuenca La Misión son (de la base a la cima): Punta Mesquite, Medio Camino, La Misión, Los Indios y Descanso.

Los cinco miembros de la Subcuenca Tijuana son (de la base a la cima): Mira al Mar, Costa Azul, Amado Nervo, Las Glorias y Los Buenos. Los afloramientos actuales de rocas de la Cuenca Rosarito Beach se encuentran limitados al este por los terrenos batolíticos y prebatolíticos de las serranías peninsulares y hacia el oeste por la actual línea de costa. La margen occidental puede extenderse para incluir a las Islas Los Coronados, cerca de Tijuana y a las Islas Todos Santos cercanas a Ensenada.

El límite norte se extiende hacia la porción sur del Condado de San Diego, California, en donde se encuentra parcialmente cubierta por sedimentos plio-pleistocénicos marinos y gravas fluviales. Los afloramientos meridionales se presentan en Punta San Miguel y al suroeste en las Islas Todos Santos.

De acuerdo con Ashby (1989) la sección típica del miembro Punta Mesquite aflora a lo largo de la costa, desde Punta Mesquite hasta el área de Medio Camino. Este miembro consiste de dos unidades: una brecha basamental y una secuencia sobreyacente de tobas y areniscas tobáceas.

La brecha es sedimentaria de color café grisáceo claro a medio, masiva a poco estratificada con clastos angulares a subangulares, pobre a moderadamente clasificados.

Sus clastos consisten de metavolcánicos prebatolíticos, rocas graníticas y sedimentarias, en una matriz de arenisca tobácea de color café grisáceo claro a medio de grano fino a medio, subangulares a subredondeados, pobremente clasificados.

Carece de fósiles y se encuentra en contacto discordante sobre el miembro lodolítico medio de la Formación Rosario. Se correlaciona con las rocas volcánicas Conejo y El Modelo del sur de California.

Neógeno Marino (Plioceno)

Se adoptó este nombre para designar a los depósitos de sedimentos que conforman las mesetas. Está constituido por areniscas y conglomerados, cuyos fragmentos fueron derivados de rocas ígneas y sedimentarias más antiguas que conforman los terrenos ubicados inmediatamente al este de la zona costera; presentan estructura masiva, con un grado bajo de fracturamiento. Su espesor estimado difícilmente supera los 50 m.

Según Gastil (1975) estos materiales se depositaron en la delgada franja costera que se extiende desde la Ciudad de Los Ángeles hasta los 28° de latitud norte, quedando incluidos en esta franja los sedimentos existentes en la zona de San Quintín.

Los depósitos marinos dieron origen a la formación de terrazas que actualmente pueden estar aflorando algunos kilómetros tierra adentro de la península y corresponde con lo que Heim (1922, en Gastil op.cit.) denominó Formación Salada.

Neógeno Continental (Plioceno)

Con este nombre se agruparon los depósitos de talud que se distribuyen sobre las unidades pre-terciarias que conforman las zonas de topografía elevada. Son materiales granulares producto de la denudación de rocas preexistentes que se encuentran consolidados, formando lomeríos sobre los flancos y base de las sierras.

Están conformados por conglomerados de rocas ígneas, cuyos fragmentos se encuentran soportados por una matriz areno-arcillosa, presentan estructura masiva y al intemperizarse tienden a formar bloques, su fracturamiento es escaso y presentan buena compactación.

La edad de estos depósitos fue determinada por Gastil (op. cit.) con base en su relación estratigráfica con los depósitos del Plioceno marino, por lo que les asignó esta misma edad.

Se presentan sobreyaciendo discordantemente a los estratos de la Formación Alisitos y a las rocas intrusivas graníticas que conforman las sierras.

Cuaternario marino (Pleistoceno)

Gastil (1975) encontró depósitos de origen marino en la costa occidental del estado de Baja California. La Unidad fue estudiada en 1944 por Hertlein (en Gastil, op. cit.), reportando, como principal característica, un paquete de areniscas y conglomerados con alteraciones ferruginosas de color rojo, intercalado con areniscas fosilíferas y coquinas. Al sur de Rosarito los fragmentos mayores están bien redondeados y son del tamaño de guijarros, soportados por una matriz arenosa poco consolidada. En la planicie costera está cubierto por los materiales aluviales recientes o conformando pequeñas mesetas.

Depósitos recientes

Con este término se denomina a los depósitos más jóvenes que se distribuyen sobre las zonas topográficamente bajas; están representados por conglomerados, areniscas, que se presentan como terrazas continentales, depósitos aluviales y palustres. Los depósitos de origen aluvial están compuestos por materiales producto de la denudación de rocas pre-existentes. Se encuentran distribuidos en zonas de pie de monte y en los lechos de cauces de ríos, arroyos y zonas topográficamente bajas, formando en ocasiones abanicos aluviales.

Están constituidos principalmente por intercalaciones de gravas y arenas con horizontes de arcilla y limo, generalmente el material está mal clasificado, no consolidado o con escasa compactación. Se encuentran distribuidos por toda el área cubriendo a las rocas más antiguas, por medio de discordancias angulares y litológicas.

Los depósitos palustres se localizan en depresiones pantanosas ubicadas en la zona cercana a la costa y están conformados por arenas, limos y arcillas; se presentan en el extremo occidental del área.

4.2 Geología estructural

La deformación dúctil está representada por foliación, esquistosidad y micropliegues en las rocas metasedimentarias y metavolcánicas. La deformación frágil fue producida por la tectónica distensiva que ha originado cuencas dentro de un sistema evolutivo de un posible pull-apart.

Las estructuras más sobresalientes son las fallas de rumbo NW con desplazamiento lateral derecho: Agua Blanca y Santo Tomás, con longitudes de 78 a 35 km. Se reconocieron otras fallas normales, unas con rumbo NE, como las fallas Tres Hermanos y la fallas de rumbo Puerto Blanco y Peralta, con longitudes de 15 a 30 km.

Estas estructuras han afectado tanto a las rocas metamórficas volcánicas y sedimentarias mesozoicas, así como a los sedimentos y depósitos volcánicos del Terciario.

La estructura Agua Blanca es la más antigua de las fallas activas originada por la subducción de la placa Farallón durante el Triásico, presenta aproximadamente 1.0 km de ancho y desplazamiento horizontal reciente de 4 a 6 mm/año (Carta Geológico-Minera H11-2 "Ensenada", escala 1:250 000 SGM, 2003).

En la zona oriental la falla normal Tres Hermanos, expone el rasgo estructural más notable. En esta misma zona predominan las fracturas entre las que destaca el Cañón San Francisquito que da origen al arroyo del mismo nombre. Un rasgo tectónico muy importante en la porción sur del Valle de Maneadero está representado por la zona de falla de Agua Blanca que representa una transcurrencia con dirección NW-SE que condiciona la ubicación y distribución de las unidades geológicas en esta porción de la zona de interés; limita en el suroeste, rocas del grupo Alisitos de los sedimentos cuaternarios.

Esta falla tiene gran influencia en los gradientes térmicos y el flujo vertical, ya que en las partes altas del cauce de los arroyos el agua subterránea presenta termalismo.

En la porción sureste rocas del Cretácico Medio están afectadas por fallas normales con echado hacia S-SE. El acuífero está alojado en una cuenca tectónica formada por rocas prebatolíticas y batolíticas, cuyo espesor promedio es de 250 m.

Desde el punto de vista morfo-tectónico, el Valle de Maneadero se ubica en la porción norte de la región conocida como Sierras Peninsulares, territorio que ha sido afectado por deformación, metamorfismo regional y emplazamiento de batolitos durante el Cretácico Temprano.

Posteriormente, durante el Cretácico Tardío y principios del Terciario, estuvo sujeta a levantamiento y erosión. Adicionalmente, durante el Mioceno-Plioceno se produjo una serie de fallamientos que controlan el desarrollo geomorfológico en esta región.

4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la interpretación conjunta de la geología superficial y del subsuelo, apoyada con la información geofísica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar que el acuífero se encuentra constituido, en su porción superior, por depósitos clásticos de origen aluvial, fluvial, eólicos y palustres de granulometría variada, conglomerados y areniscas depositados en los cauces de los arroyos San Carlos y San Francisquito y en la planicie costera; en tanto que la porción inferior se aloja en rocas volcánicas, sedimentarias y vulcanoclásticas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

Las fronteras y el basamento hidrogeológico están representados por las mismas rocas volcánicas y vulcanosedimentarias (Formación Alisitos) cuando a profundidad desaparece el fracturamiento y la alteración; así como por las rocas intrusivas y metasedimentarias. El espesor de los depósitos clásticos es de 20 a 80 m, en tanto que el medio fracturado puede alcanzar algunas decenas de metros.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

La información de los cortes litológicos de pozos, los sondeos geofísicos y la información de la geología superficial, permiten establecer que el acuífero es de **tipo libre**, heterogéneo y anisotrópico, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la existencia de sedimentos arcillosos.

Está integrado, en su porción superior por un medio granular constituido por sedimentos clásticos de granulometría variada, areniscas, conglomerados, depósitos eólicos y palustres; en su porción inferior por rocas volcánicas y sedimentarias que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y alteración.

En la porción suroccidental se ha identificado la presencia de un estrato arcilloso de hasta 100 m de espesor que le confiere propiedades semiconfinantes.

De acuerdo con su permeabilidad, es posible agrupar las distintas litologías en las unidades hidrogeológicas que a continuación se describen, las cuales conforman el medio poroso o granular y el medio fracturado por el que se desplaza el agua subterránea:

Depósitos granulares no consolidados de permeabilidad media a alta. Están constituidos por depósitos clásticos no consolidados del Terciario y Cuaternario, que rellenan la porción superior del valle y están compuestos por una gran diversidad de material granular, aluvial y fluvial; así como las areniscas y conglomerados de la Formación Rosario.

Derrames volcánicos, rocas sedimentarias y vulcanosedimentarias de permeabilidad media a baja. Dentro de esta unidad se considera la secuencia volcánica y vulcanosedimentaria del Cretácico Inferior, los derrames de basaltos cuaternarios, andesitas tobas así como las lutitas de la Formación Rosario. Su interés hidrogeológico se restringe a las zonas en las que sus afloramientos presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

En general funcionan como barreras al flujo subterráneo y basamento hidrogeológico.

Rocas ígneas y metamórficas de baja permeabilidad. Esta unidad está integrada por los cuerpos intrusivos que afloran en las porciones centro y sur del acuífero, así como por las secuencias metasedimentarias constituidas por filitas, esquistos, pizarras y gneises. Son materiales muy compactos, de baja conductividad hidráulica, que funcionan como basamento regional del acuífero y fronteras al flujo del agua subterránea; sin embargo, localmente, el fracturamiento puede incrementar su permeabilidad.

El movimiento del agua subterránea en el medio granular está controlado por las variaciones de permeabilidad de los diferentes depósitos, mientras que en el medio fracturado su trayectoria depende del patrón de fracturas y fallas.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2013, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de corta duración (4 a 6 horas), tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente, como resultado de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, por métodos analíticos convencionales y por el método numérico Rathod and Rushton (1991), se estima que los valores de transmisividad varían de **3.0×10^{-4} a $2.5 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$** , predominando valores entre 2.5 y $15.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de conductividad hidráulica varían de **6.7×10^{-5} a $1.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (5.8 a 115 m/d)**. Los valores más altos se presentan en los depósitos granulares del cauce de los arroyos San Carlos y San Francisquito y los menores en la planicie costera, asociados a depósitos de granulometría fina.

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el método de Rathod and Rushton se obtuvieron coeficientes de almacenamiento que varían de 0.005 a 0.01 y almacenamiento específico entre 0.01 y 0.15.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea y del balance de aguas subterráneas se consideró el periodo 2009-2013.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La profundidad al nivel estático en 2013 varía de 3 a 70 m, incrementándose por efecto de la topografía desde la zona próxima a la costa hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero. Los valores más someros se presentan en la zona costera del valle, mientras que las zonas con mayor profundidad se registran en la porción sur del acuífero, y hacia la entrada de los cañones de los arroyos San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito, que descienden de la sierra.

De la porción media del valle hasta Rodolfo Sánchez Taboada (Maneadero), la profundidad al nivel del agua subterránea varía de 10 a 30 m. (figura 4). La variación de la profundidad del nivel estático no representa de forma directa la sobreexplotación a la que está sometido el acuífero, debido a que la intrusión de agua salobre procedente del mar reemplaza el agua dulce que se está extrayendo. En los cauces de los arroyos se presentan niveles freáticos someros.

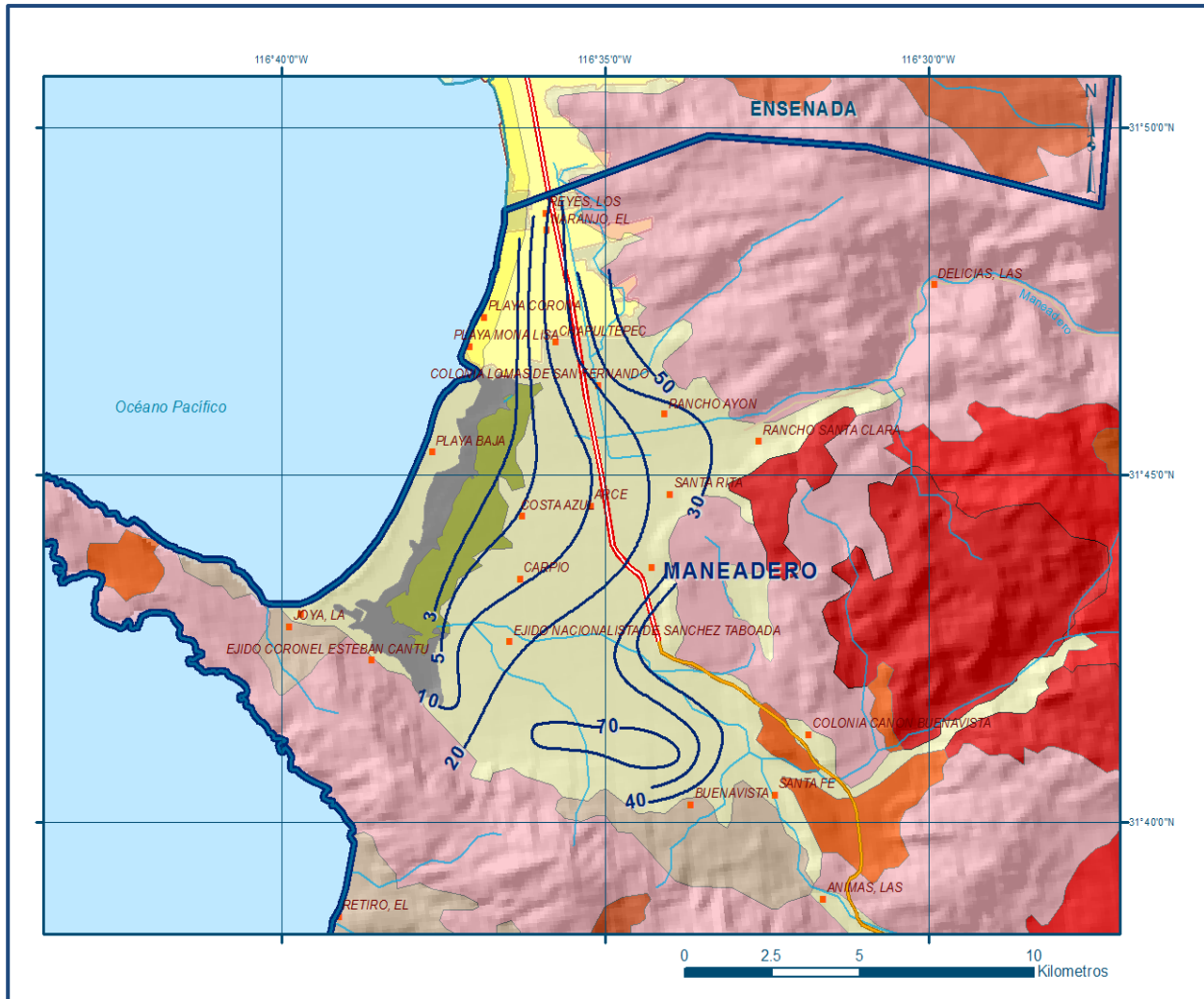


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2013)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático para el 2013, se puede observar que en la mayor parte de la planicie costera se registran valores bajo del nivel medio del mar (mbnm) que provocan la inversión del gradiente hidráulico tierra adentro y la intrusión marina; varían de 1 mbnm en la toda la porción costera a 5 mbnm que se registran al sureste de Lomas de San Fernando y al sur de Maneadero (figura 5). Sólo en la entrada a los cañones de los arroyos San Carlos y San Francisquito se registran elevaciones del nivel estático de hasta 20 a 70 msnm, respectivamente.

Esta condición se ha mantenido desde finales de la década de los 90's, sólo se presentan cambios positivos cuando se registran lluvias extraordinarias que permiten la infiltración de los escurrimientos.

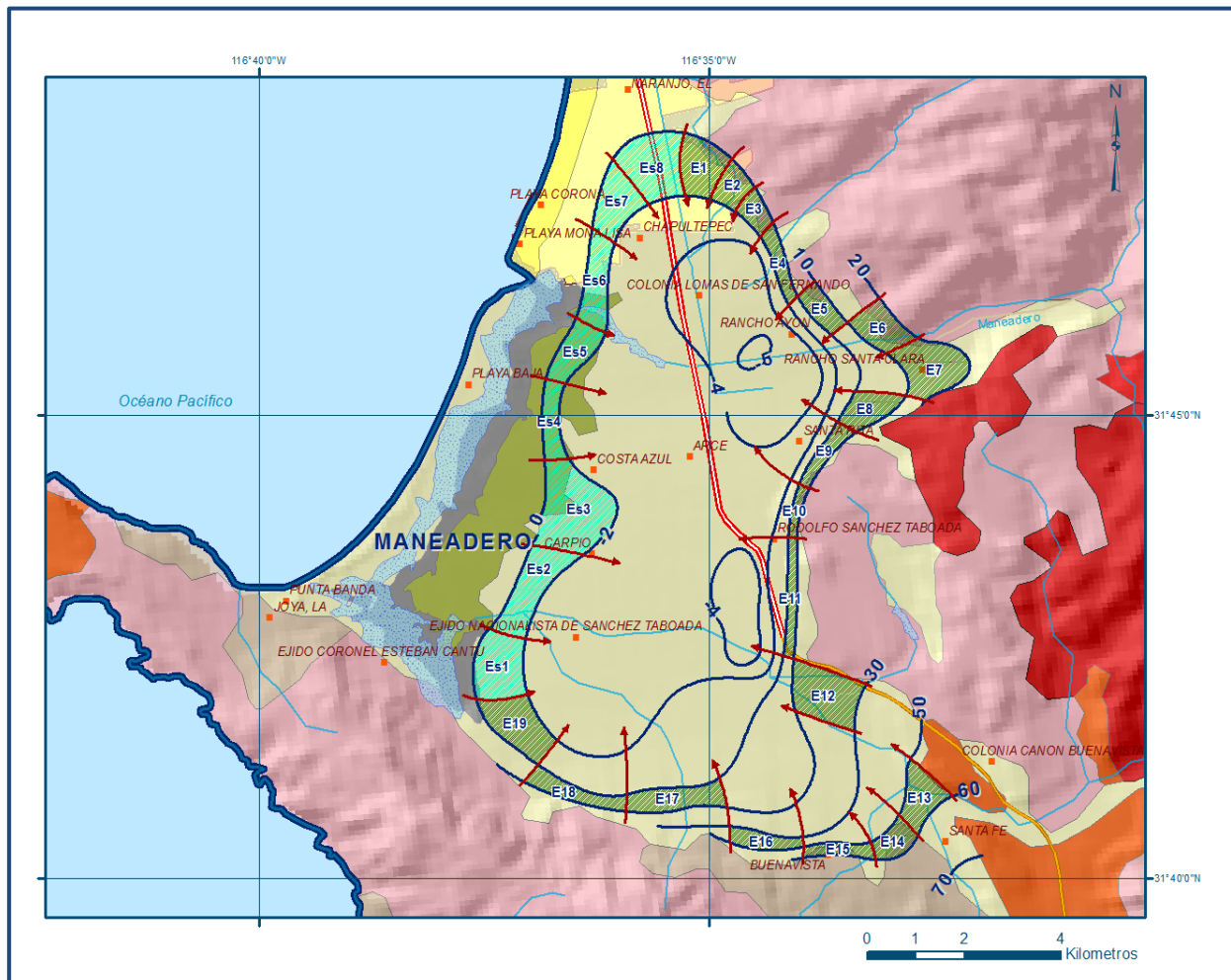


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2013)

5.4.3 Evolución del nivel estático

Con respecto a la configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2011-2012, se registran valores tanto de abatimiento como de recuperación. En la porción sur del acuífero, se registran abatimientos de 5 a 30 m, en la porción norte no se contó con información piezométrica suficiente para determinar su evolución. Entre las localidades Zamora y Ejido Nacionalista Sánchez Taboada sólo se identifica la línea de cero de abatimiento, definida de sur a norte (figura 6). Sólo en la zona de los cauces de los arroyos se registran valores de recuperación.

Los valores de recuperación y de abatimiento tienden a anularse y como consecuencia el abatimiento medio anual es prácticamente imperceptible, 0.5 m anuales en promedio, situación que puede interpretarse como una condición de equilibrio

hidrogeológico, que en realidad es consecuencia de la intrusión marina la cual al inducir el ingreso de agua salobre nulifica los abatimientos.

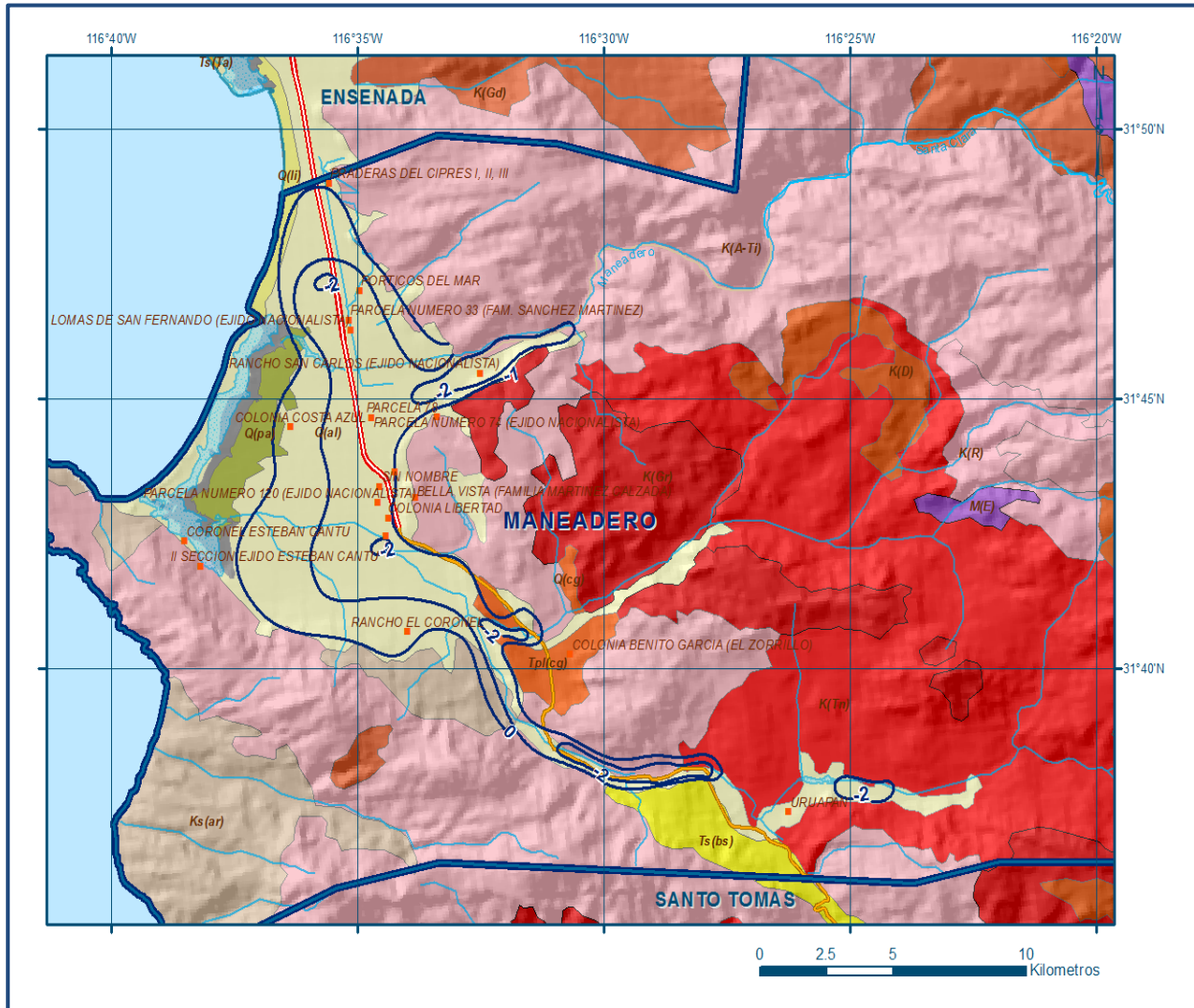


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2009-2013)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo de los estudios realizados en 2009 (Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero de Maneadero A.C.) se tomaron 20 muestras de agua subterránea en aprovechamientos distribuidos en la zona para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyen parámetros fisicoquímicos, temperatura, iones principales y menores, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (pH), dureza y sólidos totales disueltos (STD).

De los resultados de análisis fisicoquímicos se determina que los valores de concentración de STD varían de 550 a 22,150 mg/l (figura 7), incrementándose desde la desembocadura de los arroyos San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito sobre la planicie, hasta la zona costera.

Casi todas las muestras presentan concentraciones de STD mayores a 1000 mg/l que establece la modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 "Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua", publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, así como de también de las concentraciones de sodio y cloruro.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el agua se clasifica como dulce a marina, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que sus valores varían de 860 a 34,600 μ S/cm.

Los mayores valores de concentración de STD y de conductividad eléctrica se registran en la zona costera en donde de manera inducida se produce una mezcla con el agua salobre; las menores se localizan hacia las zonas de recarga que se ubican en la porción oriental del acuífero.

Ambos valores se incrementan gradualmente desde la porción oriental del acuífero hacia la zona costera, en la dirección del escurrimiento superficial de los arroyos San Carlos, Las Ánimas y San Francisquito.

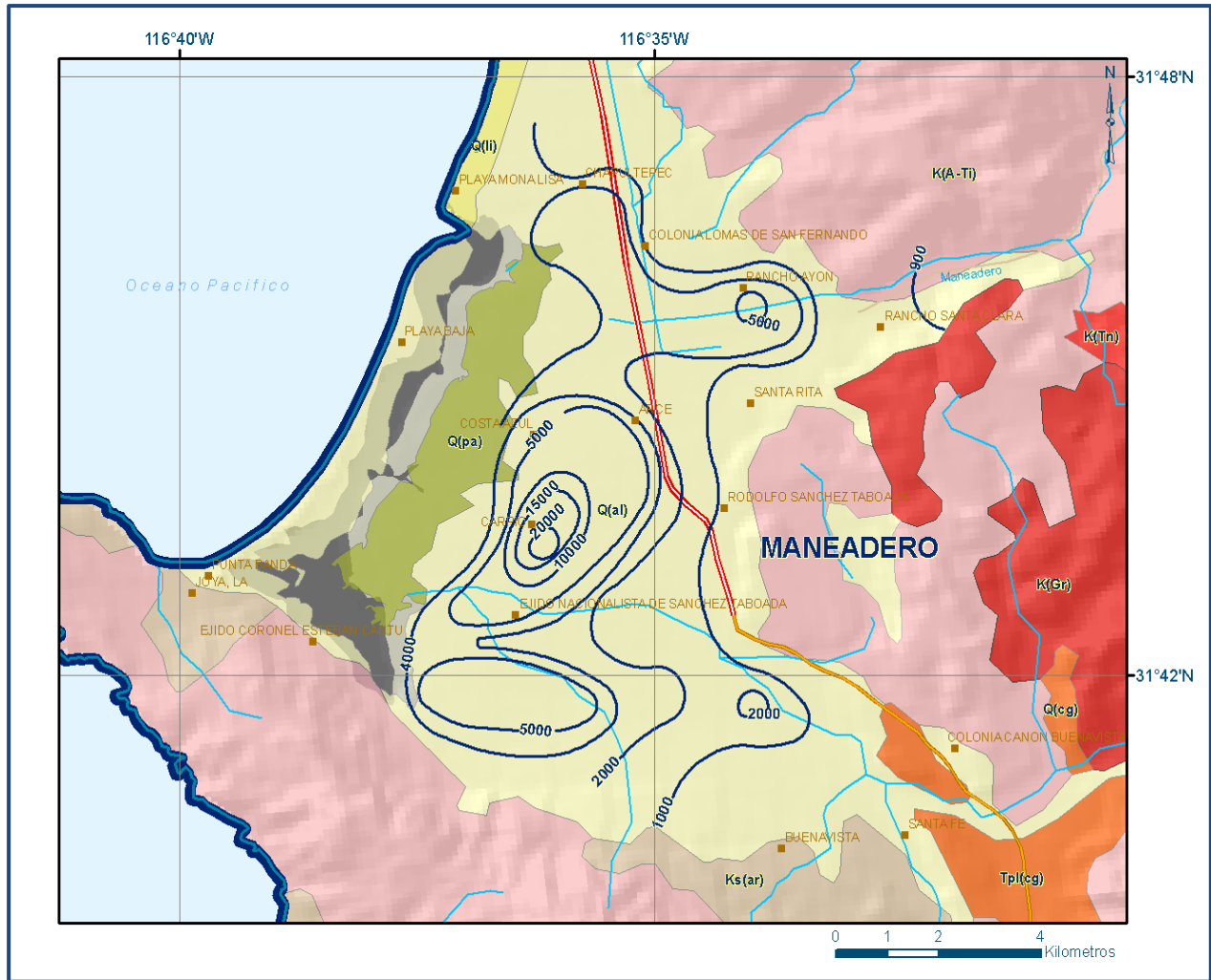


Figura 7. Concentración de STD en mg/l (2009)

La interpretación de los perfiles de conductividad eléctrica realizados en 2013, relacionados con la concentración de STD, indican que a partir de la elevación 0 (nivel del mar), el nivel saturado en la zona donde los cañones de los arroyos desembocan en la planicie, presenta concentraciones de STD menores de 2000 mg/l.

Sin embargo a partir de los 20 m de profundidad el agua salobre contenida en la planicie costera presenta concentraciones de STD superiores a 3500 mg/l que reflejan la intrusión del agua de mar. Para la profundidad máxima promedio de 40 m de espesor saturado de los aprovechamientos, no se detecta una variación importante de la salinidad en el sentido vertical.

Las variaciones de la conductividad eléctrica están relacionadas con la ubicación espacial de los sitios con respecto al frente salino. Obviamente, los sitios más cercanos a la costa son los que presentan mayores valores de resistividad y los más cercanos a las zonas de recarga registran menores valores y menor cambio con respecto a la profundidad. Con respecto a la familia de agua predominante, de acuerdo con los iones presentes en la mayor parte de la planicie costera predominan las familias sódica-clorurada y cálcica-clorurada; sólo algunas muestras cuyos aprovechamientos se ubican en los cauces de los arroyos, pertenecen a la familia del agua bicarbonatada-cálcica.

La diferencia en la composición química del agua subterránea se debe a las reacciones de intercambio catiónico que se desarrollan en el acuífero: de tipo directo cuando el Na^+ de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el Ca^{+2} disuelto en el agua subterránea y de tipo inverso cuando el Ca^{+2} de la fracción arcillosa del acuífero se intercambia por el Na^+ contenido en el agua subterránea.

En este sentido, es posible diferenciar dos grupos: el grupo 1, de mayor salinidad, se caracteriza por presentar altas concentraciones de cloruro y sodio, debido a que no existen aprovechamientos subterráneos que capten el miembro extremo salino; al grupo 2 pertenecen la mayor parte de las muestras de agua subterránea, cuya composición química está determinada por la mezcla con agua salina y reacciones de intercambio catiónico inverso, típicas de la intrusión marina. La relación lineal Na vs. Cl indica que la mayor parte de las muestras de agua subterránea manifiesta una clara evolución hacia la salinización.

De acuerdo con los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo del 2022, se registran concentraciones mayores a los LMP con respecto a Na^+ , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} y STD.

Además de la contaminación por intrusión marina, aunque actualmente el acuífero no está contaminado por organismos patógenos, presenta un riesgo potencial a la contaminación por actividades antropogénicas como la agricultura que utiliza agroquímicos, pesticidas y fertilizantes o de los asentamientos humanos que generan aguas residuales.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA), para julio de 2013 existían 396 aprovechamientos. De los cuales 293 son pozos, 94 norias y 9 manantiales. Del total de obras, que en conjunto extraen un volumen de **42.7 hm³ anuales**.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2009 a 2012, en una superficie de 86 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 la conservación de la masa es la siguiente:

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

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

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

7.1 Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico del acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos (Rv), la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo horizontal (Ehd) y la proveniente del mar como efecto del fenómeno de intrusión marina (Ehs).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela, y de las fugas en la red de agua potable y alcantarillado, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (R_i). Debido a que la extracción para uso público urbano es incipiente y el uso agrícola tiene un alto porcentaje de eficiencia en el riego, por lo que tampoco se considera volumen retornos de riego.

7.1.1 Recarga vertical (R_v)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se cuenta con información para calcular el cambio de almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance definida por la expresión:

$$R_v + E_h + E_{hs} - B - S_{sb} = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

R_v : Recarga vertical

E_h : Entradas por flujo subterráneo horizontal

E_{hs} : Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal

B : Bombeo

S_{sb} : Extracción de agua salobre por bombeo

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

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + S_{sb} - E_h - E_{hs} \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (E_h)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del área de estudio se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del piedemonte, 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 el cálculo de las entradas por flujo horizontal subterráneo se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2013, mostrada en la figura 5. Con base en esta configuración 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:

$$Q = T \cdot B \cdot i$$

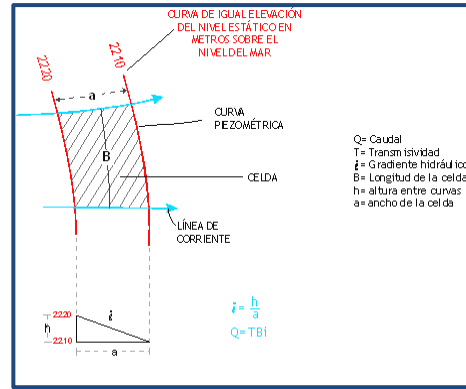
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/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 celda establecida (tabla 2). El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal es de **12.3 hm³/año**. Los valores de T utilizados para el cálculo de entradas y salidas subterráneas se obtuvieron del promedio de las pruebas de bombeo realizadas en 2013 y en estudios previos, adaptados al espesor saturado.

Tabla 2. Entradas de agua dulce por flujo subterráneo horizontal (2013)

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	890	710	2	0.00282	0.0010	0.0025	0.1
E2	710	445	2	0.00449	0.0010	0.0032	0.1
E3	800	265	2	0.00755	0.0010	0.0060	0.2
E4	1775	220	2	0.00909	0.0005	0.0081	0.3
E5	1155	355	10	0.02817	0.0005	0.0163	0.5
E6	800	400	10	0.02500	0.0005	0.0100	0.3
E7	975	755	10	0.01325	0.0025	0.0323	1.0
E8	890	575	10	0.01739	0.0005	0.0077	0.2
E9	1775	265	10	0.03774	0.0005	0.0335	1.1
E10	890	310	10	0.03226	0.0005	0.0144	0.5
E11	2575	205	10	0.04878	0.0005	0.0628	2.0
E12	800	890	20	0.02247	0.0020	0.0360	1.1
E13	905	845	10	0.01183	0.0030	0.0321	1.0
E14	800	490	10	0.02041	0.0005	0.0082	0.3
E15	1420	220	10	0.04545	0.0005	0.0323	1.0
E16	1690	310	10	0.03226	0.0005	0.0273	0.9
E17	2045	310	10	0.03226	0.0005	0.0330	1.0
E18	2220	490	10	0.02041	0.0005	0.0227	0.7
E19	1510	605	2	0.00331	0.0005	0.0025	0.1
TOTAL							12.3

7.1.3 Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (Ehs)

Las entradas de agua salobre, por flujo subterráneo horizontal, fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas de agua dulce, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5 y considerando el mismo valor promedio de transmisividad (tabla 3). El volumen total de entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal es de **4.0 hm³/año**.

Tabla 3. Entradas de agua salobre por flujo subterráneo horizontal (2013)

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)
Es1	1245	710	2	0.00282	0.0050	0.0175	0.6
Es2	1865	535	2	0.00374	0.0050	0.0349	1.1
Es3	1645	800	2	0.00250	0.0030	0.0123	0.4
Es4	1775	310	2	0.00645	0.0010	0.0115	0.4
Es5	1420	490	2	0.00408	0.0010	0.0058	0.2
Es6	1955	445	2	0.00449	0.0030	0.0264	0.8
Es7	1155	665	2	0.00301	0.0030	0.0104	0.3
Es8	1335	1065	2	0.00188	0.0030	0.0075	0.2
Total entradas							4.0

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B) en este caso también está incluido el volumen de agua salobre por bombeo (Ssb).

7.1.1 Extracción por bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **42.6 hm³/año**.

7.1.2 Salidas de agua salobre (Ssb)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción calculado es de **4.0 hm³/año**.

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

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2009-2012 (figura 6). Con base en ella y considerando un rendimiento específico de 0.15, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 86 km², mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

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

S= Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance;

A= Área de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

h= Valor de la variación piezométrica en el período (m);

Los valores obtenidos para cada variación piezométrica durante el período 2009-2012 se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento es de **-4.9 hm³/año**.

Por lo tanto, **$\Delta V(S) = - 4.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$** .

Tabla 3. Cálculo del cambio de almacenamiento (2009-2012)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -1	-0.5	36.1	0.15	-2.7
-1 a -2	-1.5	41.6	0.15	-9.4
-2	-2.0	8.3	0.15	-2.5
TOTAL		86.0		-14.6
		Promedio anual		-4.9

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia, mediante la expresión (2), establecida anteriormente:

$$R_v = B - E_h - E_{hs} \pm \Delta V(S) \quad (2)$$

Sustituyendo valores:

$$R_v = 42.7 - 12.3 - 4.0 - 4.9$$

$$R_v = 21.5 \text{ hm}^3$$

Por lo tanto la recarga total es igual a la suma de todas las entradas, exceptuando las entradas de agua salobre por ser agua de mala calidad:

$$R = R_v + E_h$$

$$R = 21.5 + 12.3$$

$$R = 33.8 \text{ hm}^3/\text{año}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

Donde:

DMA = Disponibilidad media anual de agua del subsuelo en un acuífero

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero.

Para este caso, su valor es de **33.8 hm³/año**, todos ellos son de recarga natural.

8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

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

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa).

Los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica. En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero. Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **40,328,785 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned}\text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 33.8 - 0.0 - 40.328785 \\ \text{DMA} &= -6.528785 \text{ hm}^3/\text{año}.\end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **6,528,785 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Aguas Subterráneas, 1994. Políticas de Operación del Acuífero del Valle de Maneadero, Baja California Norte.

Comisión Nacional del Agua, 1999 (a). Caracterización Hidrogeológica del Valle de Maneadero, B.C. Realizado por la Comisión Federal de Electricidad.

Comisión Nacional del Agua, 1999 (b). Estudio de Simulación Hidrodinámica del Acuífero Maneadero, Baja California Norte. Elaborado por Desarrollo y Sistemas, S.A.

Comisión Nacional del Agua, 2002. Plan de Manejo Integrado para el Acuífero Maneadero, Baja California Norte. Elaborado por Desarrollo y Sistemas, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1974. Estudio Geohidrológico del Valle de Maneadero, en el Estado de Baja California Norte. Elaborado por Técnicas Modernas de Ingeniería S.A. de C.V.