



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA
GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO NAVIDAD-POTOSÍ-RAÍCES (1916),
ESTADO DE NUEVO LEÓN**

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.....	10
4. GEOLOGÍA.....	11
4.1 Estratigrafía	13
4.2 Geología estructural.....	21
4.3 Geología del subsuelo.....	23
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1 Tipo de acuífero.....	24
5.2 Parámetros hidráulicos	25
5.3 Piezometría.....	26
5.4 Comportamiento hidráulico.....	26
5.4.1 Profundidad al nivel estático	26
5.4.2 Elevación del nivel estático	27
5.4.3 Evolución del nivel estático.....	28
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea	29
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	30
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	30
7.1 Entradas.....	30
7.1.1 Recarga vertical (Rv).....	31
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	31
7.1.3 Recarga inducida (Ri).....	33
7.2 Salidas.....	33
7.2.1 Extracción por bombeo (B)	33
7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)	33
8. DISPONIBILIDAD	34
8.1 Recarga total media anual (R).....	35
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	35
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	35
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	36
9. BIBLIOGRAFÍA	37

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 Navidad-Potosí-Raíces, definido con la clave 1916 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción suroccidental del estado de Nuevo León, en el límite con el estado de Coahuila, entre los paralelos 24° 21' y 25° 16' de latitud norte y entre los meridianos 100° 02' y 100° 49' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 4,165 km².

Geopolíticamente, casi la totalidad de su superficie se ubica en el municipio de Galeana y sólo pequeñas áreas de su extremo suroriental pertenecen a los municipios Doctor Arroyo y Aramberri (figura 1)..



Figura 1. Localización del acuífero

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

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUÍFERO 16 NAVIDAD-POTOSÍ-RAÍCES							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDO	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	100	17	40.6	24	52	57.0	
2	100	13	59.5	24	52	16.4	
3	100	13	12.0	24	48	13.5	
4	100	7	15.5	24	38	57.5	
5	100	2	42.7	24	34	19.4	
6	100	2	45.4	24	30	58.8	
7	100	5	35.0	24	27	19.4	
8	100	10	2.4	24	28	19.1	
9	100	15	58.1	24	23	17.6	
10	100	17	19.0	24	21	26.0	
11	100	26	9.0	24	24	37.7	
12	100	28	16.2	24	31	20.9	
13	100	37	49.7	24	38	33.7	
14	100	44	55.7	24	44	32.2	DEL 14 AL 15 POR EL LIMITE ESTATAL
15	100	48	18.8	25	8	58.0	DEL 15 AL 16 POR EL LIMITE ESTATAL
16	100	22	50.8	25	12	6.7	
17	100	27	7.7	25	10	40.2	
18	100	26	23.2	25	8	57.3	
19	100	27	47.6	25	5	49.6	
20	100	21	40.1	25	3	20.3	
21	100	22	22.0	24	59	19.5	
22	100	17	40.6	24	55	57.2	
1	100	17	40.6	24	52	57.0	

Limita al norte con el acuífero Región Manzanera-Zapalinamé, del estado de Coahuila; al noreste con Citrícola Norte; al este con Citrícola Sur; al sur con los acuíferos El Peñuelo-San José El Palmar y Santa Rita-Cruz de Elorza; al sureste con Sandía-La Unión, todos pertenecientes al estado de Nuevo León; al oeste limita con el acuífero Saltillo Sur, que pertenece al estado de Coahuila.

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo” y al Consejo de Cuenca “Altiplano”, instalado el 23 de noviembre de 1999. Su territorio se encuentra parcialmente vedado, casi en su totalidad sujeto a las disposiciones del “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en la superficie comprendida dentro del límite geopolítico del Municipio de Galeana, Edo. de Nuevo León, para el mejor control de las extracciones, uso y aprovechamiento de aguas del subsuelo en dicha zona”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de julio de 1978. Esta veda es tipo II, en la que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos.

Solo en una pequeña superficie de su extremo nororiental no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea. Sin embargo, se encuentra sujeta a las disposiciones del “*ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento en las porciones no vedadas, no reglamentadas o no sujetas a reserva de los 18 acuíferos que se indican*”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del acuífero, se prohíbe 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, y el incremento de volúmenes autorizados o registrados, 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 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1. El uso principal del agua subterránea es el agrícola. En su territorio no se localiza distrito o unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido hasta la fecha el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la superficie que cubre el acuífero se han llevado a cabo estudios geohidrológicos de evaluación, algunos de cobertura regional. Entre los más importantes se mencionan los siguientes:

ESTUDIOS AGROLÓGICOS Y GEOHIDROLÓGICOS DE LA ZONA DEL CUIJE-POTOSÍ-RAÍCES DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN, realizado en 1977 por Ingeniería y Geotecnia, S.A. para para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Entre los aspectos más relevantes define la existencia de dos acuíferos en el Valle El Potosí, el primero de tipo granular conformado por depósitos de tipo aluvial, lacustre y de pie de monte; en tanto que el segundo acuífero se localiza en las rocas carbonatadas de las formaciones geológicas Cuesta del Cura, Aurora y Cupido. La extracción de agua subterránea reportada para el acuífero granular fue de 77 hm³/año. En cuanto a la salinidad del agua subterránea, se registraron concentraciones de sólidos totales disueltos que variaron de 300 a 2,500 ppm.

ESTUDIO INTEGRAL DE LA ZONA EL POTOSÍ, ESTADO DE NUEVO LEÓN, realizado en 1979 por Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Retoma los resultados del estudio de 1977 y aporta información de los parámetros hidráulicos a través de pruebas de bombeo, cuya interpretación reporta valores promedio de transmisividad de $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, para el acuífero granular, y de 12 a $400 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, para el acuífero alojado en rocas calcáreas. La salinidad del agua manifiesta valores mayores de 1,500 ppm en el acuífero granular.

SERVICIOS DE PROYECCIÓN Y LEVANTAMIENTOS GEOLÓGICOS EN LA ZONA DE GALENA, ESTADO DE NUEVO LEÓN. Realizado en 1979 por Hidrogeología, S.A. para para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH).

Su objetivo la exploración de la zona en la que afloran las rocas calizas de las formaciones Aurora y Cupido, para la identificación de los sitios más adecuados para la perforación exploratorios con fines de explotación.

ACTUALIZACIÓN DE CONDICIONES PIEZOMÉTRICAS DE LOS CAMPOS BUENOS AIRES, MINA, ZONA CITRÍCOLA, SABINAS PARÁS Y VALLE NAVIDAD-POTOSÍ-RAÍCES. Realizado en 1987 por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Entre los aspectos más relevantes relativos al acuífero Valle Navidad-Potosí-Raíces, el estudio contempla trabajos de piezometría con información de 1987.

ESTUDIO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DE LOS ACUÍFEROS SALTILLO-RAMOS ARIZPE, COAH. Y NAVIDAD-POTOSÍ-RAÍCES. Realizado en 1999 por Consultores Infraestructura y Servicios, S.A. de C.V. para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo por objeto determinar la magnitud de las componentes de la ecuación de balance de aguas subterráneas, para conocer su disponibilidad. Propone un modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero, considerando la distribución espacial de los parámetros hidráulicos y geometría. Construye un modelo tridimensional de simulación hidrodinámica utilizando el código numérico Visual MODFLOW y el valor de las componentes del balance de aguas subterráneas para su calibración. Finalmente, diseña una red para el monitoreo de niveles de agua subterránea. Desde el punto de vista hidrogeológico, identifica un acuífero somero granular de tipo libre, el cual presenta un espesor variable menor de 150 m, mayor en el centro de los valles, que disminuye gradualmente hacia las sierras. A esta unidad estratigráfica la subyace el acuífero alojado en calizas denominado intermedio, el cual está también ampliamente distribuido hacia las márgenes de la cuenca, especialmente en los flancos SW, N y NW; su espesor varía de más de 300 m en la parte central del valle, a menos de 120 m hacia las sierras.

REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO PIEZOMÉTRICO DE LOS ACUÍFEROS DE LOS VALLES DE: ZONA CITRÍCOLA NORTE, ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY Y NAVIDAD-POTOSÍ-RAÍCES, ESTADO DE NUEVO LEÓN, Realizado en 2002 por Ingeniería Geológica Computarizada, S.A de C.V, para la Comisión Nacional del Agua. Define una red de monitoreo para la obtención de información hidrogeológica y piezométrica de estos acuíferos, para determinar su evolución en el tiempo como resultado de las variables que intervienen en el proceso de recarga y descarga y conocer su condición actual en cuanto a niveles del agua subterránea.

ANÁLISIS DE LOS NIVELES DEL AGUA SUBTERRÁNEA DE LAS REDES PIEZOMÉTRICAS MEDIDAS EN 2013, EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN. Realizado por el Organismo de Cuenca Río Bravo, de la Comisión Nacional del Agua en enero de 2014. El análisis incluye a los acuíferos Citrícola Norte y Navidad-Potosí-Raíces y su objetivo fue la medición de niveles del agua subterránea en 2013 para elaborar las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático, así como su evolución en el tiempo. Para el caso de la evolución, se consideró el periodo 2000-2013. Se elaboraron hidrógrafos en los que se analizó el comportamiento de los niveles del agua en 18 pozos.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DE LOS ACUÍFEROS 1906, ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY; 1912 CITRÍCOLA NORTE; 1916 NAVIDAD.POTOSÍ-RAÍCES, EN EL ESTADO DE NUEVO LEÓN. Realizado en 2014 por Moro Ingeniería, S.C., para la Comisión Nacional del Agua. El estudio tuvo como objetivo general actualizar el conocimiento de la condición geohidrológica de los acuíferos, definir 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. Este trabajo constituye 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 el acuífero se ubica completamente en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, la cual representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que representa una franja alargada orientada en sentido noroeste-sureste, desde Chihuahua-Coahuila hasta el Istmo de Tehuantepec, que presenta una flexión con orientación este-oeste entre Torreón y Monterrey; está integrada principalmente por sedimentos calcáreos del Cretácico y Jurásico que se encuentran plegados, formando valles estructurales (Manuel Álvarez Jr.) en los sinclinales y serranías en los anticlinales cuando las formaciones son resistentes a la erosión, pero cuando estos últimos dejan al descubierto un núcleo constituido por rocas menos resistentes, entonces se forman valles en su centro.

Debido a la intensidad de los plegamientos, la topografía es sumamente accidentada, ofreciendo perfiles típicamente aserrados.

Por otro lado, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1989), la mayor parte del acuífero se localiza en la Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales; mientras que en menor proporción, hacia las sierras ubicadas en los extremos nororiente y oriente, entre las que se encuentra la Sierra El Potosí, la zona pertenece a la Subprovincia Gran Sierra Plegada y una pequeña de la región occidental, donde se localiza la sierra Las Mazmorras, se ubica en la Subprovincia Sierras Transversales.

La Subprovincia Sierras y Llanuras Occidentales se caracteriza por presentar sierras orientadas en sentido norte-sur, compuestas por secuencias de rocas calcáreas, enlazadas entre sí por conjuntos de cerros que siguen ese mismo sentido o que son oblicuos. La Subprovincia Gran Sierra Plegada está representada por sistemas de topofomas integradas por sierras plegadas y sierras complejas (pliegues y fallas), pero en ella también existen bajadas, lomeríos, mesetas, llanuras y valles.

Por último, la Subprovincia Sierras Transversales está integrada por sierras perpendiculares a los cuerpos centrales de la Sierra Madre Oriental, separadas unas de otras por llanuras más o menos amplias.

En su porción central varios pequeños pliegues paralelos descienden desde la subprovincia de los Pliegues Saltillo-Parras, hasta el distrito minero de Concepción del Oro, Zacatecas. Su característica más notable es la complejidad litológica que se presenta, representada por afloramientos de rocas tan diversas como sedimentarias, principalmente calcáreas, metamórficas e ígneas intrusivas y extrusivas.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en el área que comprende el acuífero se presentan tres tipos de clima: en la mayor parte de su superficie dominan los climas secos claves $BS_0k(x')$ y $BS_1k(x')$; seco templado el primero y semiseco templado el segundo, ambos con lluvias escasas todo el año y precipitación invernal mayor al 18 %.

El clima seco estepario (BS), que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco (1), con grado de humedad mayor que 22.9 (coeficiente que resulta de la relación precipitación/temperatura). Su condición de temperatura (k), que es una característica establecida considerando las temperaturas medias anuales del mes más frío y del más cálido, templado con verano cálido.

En las regiones altas que constituyen dos franjas localizadas en las porciones oriental y occidental del acuífero, el clima es templado, con claves $C(w_0)x'$ y $Cb(w_1)(x')$; ambos son templados subhúmedos, el primero con lluvias escasas todo el año y porcentaje de precipitación invernal superior al 18 % y el segundo con lluvias en verano y porcentaje mayor al 10.2 %. Por último, en las zonas de mayor elevación topográfica, como son las sierras Las Mazmorras, Esmeralda y El Potosí, el clima es de tipo Cx' templado subhúmedo.

Para la determinación de las variables climatológicas se cuenta con información de 10 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: El Rucio, San Rafael, El Cuije, La Carbonera, El Potosí, San Roberto, San Jorge Galeana, San José de Raíces, San Antonio del Salero y El Refugio, cuyo registro comprende el periodo 1956-2012.

Con estos datos y utilizando el método de los Polígonos de Thiessen, se determinaron valores medios anuales de precipitación, temperatura y evaporación potencial de **364.3 mm**, **11.7 °C** y **1692 mm**, respectivamente.

3.3 Hidrografía

El área que cubre el acuífero se encuentra ubicada en su totalidad dentro de la Región Hidrológica 37 “El Salado”, Subregión Hidrológica “El Salado”, cuenca “Sierra Madre Oriental”, subcuenca del Río San Rafael, que forma parte de la Cuenca Río Bravo-San Juan; una pequeña área pertenece a la subcuenca del Río Santa Ana. Está comprendida entre los meridianos 99°29' y 102°57' de longitud oeste y los paralelos 21°47' y 25°23' de latitud norte. Su área es de 94,243 km²; limita al norte con la Región Hidrológica 24c, al noreste con la Región Hidrológica 25, al este y sureste con la Región Hidrológica 26, al suroeste con la Región Hidrológica 12 y al oeste y noroeste con la Región Hidrológica 36.

Es una de las vertientes interiores más importantes del país; se localiza en la altiplanicie septentrional y la mayor parte de su territorio se sitúa a la altura del Trópico de Cáncer, que lo atraviesa. Todo este conjunto hidrográfico está constituido por una serie de cuencas cerradas de muy diferentes dimensiones, con escurrimientos de poca importancia. Debido a que la lámina media anual de precipitación es baja, los arroyos son escasos y de tipo intermitente, cuyos escurrimientos desaparecen hacia el centro de los valles en los que el material aluvial alcanza los máximos espesores. La hidrografía está representada por escurrimientos de carácter efímero que pierden su curso al alcanzar la zona de pie de monte o de planicie; en la Subcuenca San Rafael, que corresponde a la de mayor superficie, sólo se ubican los arroyos San Pablo y El Carmen y una zona de topografía baja que es el Bajío San Agustín; en la porción sur del acuífero no hay corrientes importantes.

La región se caracteriza por presentar una serie de llanuras desérticas, en general con escurrimiento superficial de muy corta longitud, ya que se infiltra en las rocas calizas que conforman las sierras y en los piedemonte. El tipo de drenaje es predominantemente paralelo. De las sierras descienden gran cantidad de arroyos intermitentes que en las cuencas se evaporan o se infiltran lentamente, originando la presencia de suelos salinos.

3.4 Geomorfología

El acuífero se localiza en el flanco suroccidental de la Curvatura de Monterrey (Padilla, 1985). El relieve de esta región está ligado a una evolución tectónica muy compleja, la cual dio como resultado estructuras intensamente plegadas de rocas sedimentarias del Jurásico Superior (Formación Olvido) y del Cretácico (formaciones La Casita, Taraises, Cupido, La Peña, Cuesta del Cura y Agua Nueva o Indidura).

En esta secuencia sedimentaria son comunes los pliegues recostados, las cabalgaduras y en algunos lugares estructuras en forma de diapiros. En conjunto el relieve se caracteriza por una serie de cadenas montañosas, valles intermontanos y depresiones kársticas, cuya dirección predominante es noroeste-sureste.

Las vertientes de las sierras tienen una pendiente muy fuerte, que presentan múltiples cornisas, escarpes y paredes subverticales; el fondo de los valles es estrecho y está parcialmente cubierto por los materiales provenientes de las vertientes. Las elevaciones principales superan los 3,000 m de altitud, destacando en la región el Cerro El Potosí que tiene una elevación de 3,760 msnm, el más alto en todo el noreste de México. Superficialmente se considera una unidad geomorfológica a los depósitos aluvio-lacustres que colmatan a los valles y otra unidad son las rocas calizas que conforman a las sierras, principalmente, por las formaciones Cupido y Cuesta del Cura. Las condiciones geomorfológicas juegan un papel muy importante en la recarga natural del sistema acuífero, ya que los procesos de plegamiento, erosión e intemperismo de los depósitos carbonatados incrementan su permeabilidad.

4. GEOLOGÍA

La geología general que aflora en la zona que comprende el acuífero está constituida por un gran paquete de material aluvial y rocas sedimentarias principalmente calcáreas, cuya distribución geográfica se muestra en la figura 2.

Regionalmente las rocas más antiguas han sido asignadas a la Formación Huizachal, del Triásico Tardío. El Jurásico Superior está representado en las inmediaciones de Galeana, N.L., donde aflora una secuencia de yesos, calizas dolomíticas y anhidritas correspondientes a la Formación Olvido del Oxfordiano-Kimmeridgiano, que se encuentran en contacto discordante con la Formación Huizachal y hacia su cima yace concordantemente con la Formación La Casita, la cual cambia lateralmente de facies con la Formación Zuloaga.

El Cretácico está representado por los sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Taraises del Berriasiano al Hauteriviano, que afloran de manera aislada. Subyace concordantemente a la Formación Cupido y cambia lateralmente de facies en el Berriasiano con lutitas y areniscas de la Formación Carbonera.

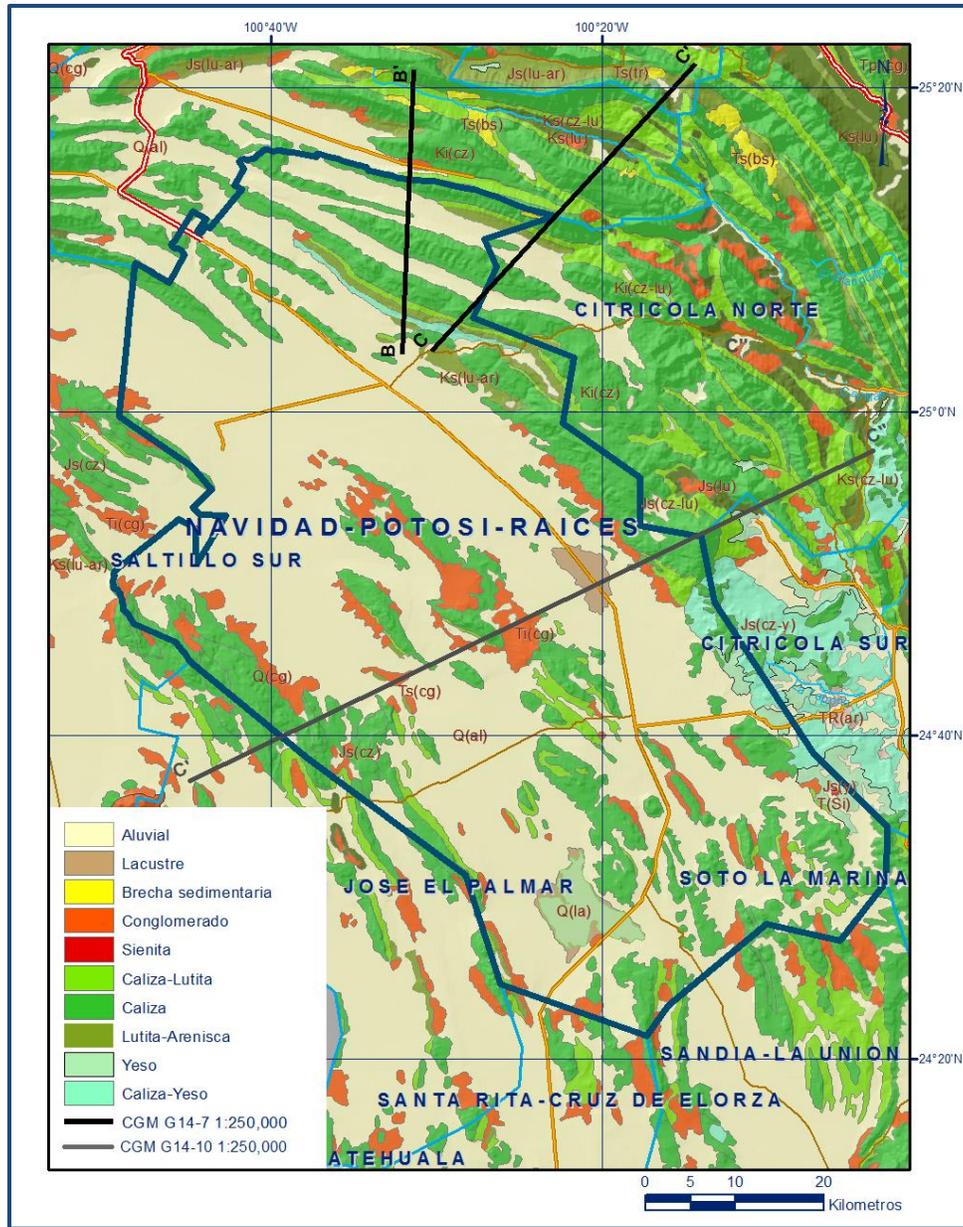


Figura 2. Geología general del acuífero

Del Hauteriviano Tardío al Aptiano Temprano se depositaron calizas de la Formación Cupido, que aflora por toda la zona; subyace concordantemente a calizas y lutitas de la Formación La Peña del Aptiano, ésta a su vez subyace transicional y concordantemente a calizas arrecifales de la Formación Aurora, la cual es correlacionable con la Formación Cuesta del Cura del Albiano-Cenomaniano (calizas-lutitas); hacia su cima se encuentra en contacto con la Formación Indidura del Cretácico Superior y en la región de Galeana, N.L. con la Formación Agua Nueva.

Durante el Cenomaniano Tardío al Turoniano se depositaron sedimentos arcillo calcáreos de la Formación Indidura (posiblemente su rango sea hasta el Santoniano), los cuales cambian gradualmente a sedimentos calcáreo-arcillosos de la Formación Agua Nueva.

En el Coniaciano-Santoniano se depositaron sedimentos areno-arcillosos de la Formación Caracol que mediante un cambio lateral de facies pasa a una secuencia de lutitas y calizas de la Formación San Felipe. La Formación Parras está constituida por lutitas y areniscas, su cambio a la Formación Caracol es transicional, esta unidad es correlacionable en la región de Galeana, N. L. con la Formación Méndez. El Terciario Inferior está representado por un conglomerado polimíctico con areniscas. Durante el Neógeno se acumularon conglomerados polimícticos y oligomícticos mal consolidados; hacia los valles se depositaron materiales coluviales y aluviales y en donde las condiciones lo permitieron, depósitos lacustres y travertinos.

4.1 Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades que afloran en la superficie cubierta por el acuífero comprende edades que varían del Jurásico Superior al Reciente (figura 2), distribuidas en la Sierra Madre Oriental.

JURÁSICO SUPERIOR

Formación Olvido

Constituida por yesos y dolomías intercalados con horizontes delgados de lutitas que conforman el núcleo de los anticlinales del área. Esta formación subyace concordantemente a la Formación La Casita y sobreyace en discordancia tectónica a la Formación Huizachal del Jurásico Superior. Se le ha asignado una edad del Oxfordiano-Argoviano. Presenta afloramientos extensos en la porción suroriental del acuífero, en la zona de San José Raíces y Boca de Refugio; se considera que en la zona de este acuífero alcanza hasta 250 m de espesor.

Formación Zuloaga

Esta formación fue descrita originalmente por Burckhardt (1906) y Bosé (1923) en la región norte-central de México, llamándola “calizas con nerineas”. Imlay (1938) asignó el nombre de Formación Zuloaga a una secuencia de calizas dispuestas en estratos gruesos, con nódulos de pedernal negro y contenido fósil de bivalvos y gasterópodos, señalando como localidad tipo la Sierra Sombrerillo, ubicada al norte del Poblado Melchor Ocampo, Zac.

Está representada por una caliza resistente a la erosión que forma los núcleos de los anticlinales en la que se distinguen dos unidades bien definidas: la parte inferior contiene capas de caliza, cuyo color varía de gris claro a ligeramente oscuro, presenta una coloración rojiza o amarillenta al intemperismo, contiene también algunas capas de limolita calcárea débilmente consolidada.

La parte superior está constituida por caliza masiva de color gris, que se caracteriza por presentar estilolitas de gran amplitud y algunos horizontes donde se presentan pequeños nódulos de pedernal de color negro.

Se correlaciona con la Formación Olvido, pero a diferencia de esta última no presenta yesos, así como la Formación La Gloria ya que representa su cambio de facies en la porción norte del sector transversal o "Curvatura de Monterrey" en donde subyace a las formaciones La Caja y La Casita. Aflora en las porciones central, oeste y norte del acuífero. Su espesor aproximado es del orden de 500 m.

Formación La Caja

Definida formalmente por Imlay (1938), designando como localidad tipo a la Vereda del Quemado, situada en el flanco meridional de la Sierra La Caja, localizada al norte de Mazapil, Zacatecas. Tiene amplia distribución en la región norte del centro de México.

Consiste en capas delgadas de calizas margosas con pedernal, fosforitas, alternando con limolitas y areniscas bituminosas, que se hacen progresivamente más finas hacia la cima.

Aflora en la mayoría de las sierras plegadas, generalmente en estrechas bandas paralelas que limitan a la Formación Zuloaga en los núcleos anticlinales. Debido a que es poco resistente a los agentes erosivos, frecuentemente se caracteriza porque en ella se desarrollan puertos y valles, que se alargan paralelamente al rumbo de las capas.

A menudo se encuentra enmascarada por una pequeña cobertura aluvial, su espesor es del orden de 100 m. Sus contactos inferior y superior son concordantes con las formaciones Zuloaga y Taraises, respectivamente. Aflora en la porción norte y poniente del acuífero.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación Taraises

Fue definida por Imlay para referirse a una sección calcárea y calcáreo-arcillosa, limitada en la parte inferior por la Formación La Caja o La Casita y en la parte superior por la Caliza Cupido, designando como localidad tipo el Cañón de Taraises, ubicado en la porción occidental de la Sierra de Parras, donde la dividió en dos miembros: El inferior conformado por capas gruesas de calizas de color gris, interestratificadas con areniscas, y el superior constituido por calizas arcillosas de color gris, nodulares y con presencia de amonitas en la parte basal. Está constituida de caliza con cantidades menores de limolita, que descansan sobre sedimentos arcillosos de la Formación La Caja.

En las partes altas de las montañas plegadas que forma, las capas de caliza son de espesor mediano a grueso, densas y de color gris claro a oscuro. La limolita que contiene se presenta intercalada en proporciones variables. La Formación Taraises es un depósito que se llevó a cabo en aguas relativamente profundas, alcanza un espesor aproximado de 150 m. Aflora en forma de franjas delgadas de poco espesor en las sierras plegadas ubicadas principalmente en la porción norte del acuífero, cuyos contactos, inferior y superior son concordantes con las formaciones La Caja y Cupido respectivamente.

Se correlaciona con las formaciones Barril Viejo, Caliza Menchaca y Padilla de las Sierra Dos Hermanas o anticlinal de Oballos; con la Arcosa San Marcos en la Sierra San Marcos, con la serie Coahuilense en el Cerro de la Silla de Monterrey y la Formación Santuario de Ixmiquilpan.

Formación Cupido

Término definido por Imlay para una sección calcárea que descansa sobre la Formación Taraises y subyace a la Formación La Peña, cuya localidad tipo es la pared norte del Cañón del Mimbre, localizado en la porción media de la Sierra de Parras, aproximadamente a 60 km al SE de la población del mismo nombre, en el estado de Coahuila. Está representada por rocas muy resistentes y homogéneas constituidas principalmente por calizas de estratificación mediana a gruesa de coloración gris claro, que presentan concreciones de piritita, lentes y nódulos de pedernal color gris y estilolitas; en algunas localidades con intercalaciones de limolitas calcáreas y en menor proporción lutitas.

Sus mejores afloramientos se localizan en el Cañón Mimbres de la porción media de la Sierra de Parras, en Coahuila. Tiene amplia distribución en las sierras de los límites oriente y poniente del acuífero, así como en algunas de la porción central. Presentan fracturamiento y desarrollo de los procesos cársticos, por lo que es una de las unidades calcáreas más importantes desde el punto de vista hidrogeológico. El contacto inferior con la Formación Taraises es nítido y concordante, el superior con la Formación La Peña es brusco y concordante.

En el área estudiada no se observaron cambios de facies. Su edad corresponde a la parte final del Hauteriviano al Aptiano Inferior y se correlaciona con la porción superior de la Formación Tamaulipas Inferior de la Cuenca Tampico-Misantla. En la Cuenca de Chihuahua se correlaciona con la porción superior de la Formación Las Vigas, con la base de la Formación Cuchillo y en el centro de Texas con la Formación Sligo.

Formación La Peña

El nombre fue introducido por Imlay (1936) para distinguir a un cuerpo compuesto por dos miembros: El inferior constituido por calizas y el superior por lutitas y calizas, que estratigráficamente se ubica entre la Caliza Cupido y la Caliza Aurora.

Su localidad tipo se ubica en el flanco norte de la Sierra de Taraises, a 4.8 km al E-SE de la Hacienda La Peña, localizada en el extremo sur del estado de Coahuila. Se describe como un grupo de estratos calcáreo arcillosos, cuya base comienza como una secuencia de calizas de estratificación delgada de color gris claro y continúa en la parte media con calizas que presentan cantidades variables de arcilla deleznable, de color amarillento y gris, con abundante pirita en las calizas y lentes pequeños de sílice blanca.

En la cima se observa una alternancia entre caliza arcillosa, con caliza micrítica con bandas y lentes de pedernal negro y estratificación ondulada. Por su naturaleza arcillosa, es fácilmente erosionable y constituye un horizonte índice ya que su identificación resulta sencilla al formar depresiones entre las calizas más resistentes de la Formación Cupido. Sus afloramientos en el área del acuífero representan franjas de espesor reducido, asociadas a la Formación Cupido, a la cual sobreyace concordantemente. A su vez, es cubierta concordantemente por la Formación Cuesta del Cura. Su espesor promedio es de 60 m.

Se correlaciona con el horizonte Otates de la Cuenca Tampico-Misantla, con la Formación Cuchillo en la Cuenca de Chihuahua y con la Formación Las Uvas del área de Acatita-Las Delicias, Coahuila.

Formación Aurora

Humphrey (1956) propuso que el término Formación Aurora fuera modificado para incluir todas las rocas carbonatadas del NE de México ubicadas estratigráficamente entre la Formación La Peña o sus equivalentes, abajo, y la Formación Cuesta del Cura y otros equivalentes del Grupo Washita o la Formación Kiamichi arriba.

Está representada por calizas de aguas profundas (mudstone y wackstone), de estratificación mediana a gruesa, en ocasiones masiva con nódulos de pedernal y en otras con delgadas capas del mismo material, que aflora en gran parte de la región ubicada entre Torreón y Monterrey.

Sus contactos inferior y superior con las formaciones La Peña y Cuesta del Cura, respectivamente, son nítidos y concordantes. Por su posición estratigráfica parece corresponder al principio del Albiano al Albiano Medio. Se correlaciona con la porción inferior de la Caliza El Abra y la porción inferior de la Formación Tamaulipas Superior, en la Cuenca Tampico-Misantla; con las formaciones Acatita y Paila del área de Delicias, Coahuila, y con la barrera arrecifal denominada Formación Viesca.

Formación Cuesta del Cura

Imlay (1936) describió por primera vez la Caliza Cuesta del Cura, de acuerdo con los afloramientos de calizas delgadas ondulantes con bandas de pedernal negro que afloran a 6.4 km al W de Parras, Coahuila, área en donde esta unidad se encuentra entre la Caliza Aurora y la Formación Indidura.

Se distribuye en los anticlinales de Parras, Taraises, Prieta y Santiago, al SE de Torreón, pero aflora ampliamente en casi toda la zona Torreón-Monterrey, aunque con espesores menores de 300 m. Su litología consiste principalmente de capas medianas a delgadas y onduladas de caliza de color gris a negra, compacta y un poco arcillosa. Contiene además nódulos, lentes y bandas de pedernal negro, ocupa generalmente las partes bajas de las sierras, aflorando como una banda de lomeríos alineados.

Sus contactos inferior y superior con las formaciones Aurora e Indidura, respectivamente, son concordantes y bruscos. Por su contenido faunístico fósil, su edad abarca desde el Albiano Medio hasta el Cenomaniano Inferior. Se correlaciona con las formaciones Tamaulipas Superior y El Abra de la Cuenca Tampico-Misantla; y la porción inferior de la Formación Kiamichi, Grupo Washita, Indiferenciado del NE de México y oriente de Texas, con la con la Formación Doctor en el centro México y La Formación Acatita, en el área de Delicias, Chihuahua.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Indidura

Fue estudiada por primera vez por Emil Bosé en 1906 en la Sierra de Parras, y posteriormente fue definida por W.A. Kelly (1936) en su localidad tipo de Delicias, Coahuila y la bautizó por el afloramiento localizado en el flanco oriental del Cerro La Indidura, localizado aproximadamente a 8 km al norte de Tanque Toribio. Generalmente aflora en las laderas de las sierras; consiste principalmente de dos series diferentes que están formadas en la parte inferior, de caliza arcillosa dispuesta en capas delgadas y lajeadas, con numerosas capas medianas o gruesas de caliza laminar color gris oscuro y de limolita calcárea que es de color amarillento.

La parte superior está formada de una lutita gris muy homogénea, fácilmente erosionable, que en la parte más alta, casi en contacto con la Formación Caracol, presenta un cambio de facies a una lutita arenosa. Sobreyace por medio de un contacto concordante y abrupto a la Formación Cuesta del Cura, solo identificado por el incremento de sedimentos pelíticos y la ausencia de pedernal. Su espesor promedio es de 200 m; se correlaciona con la Formación Soyatal de la Cuenca Mesozoica del centro de México, con la Formación Mezcala del Sur de México y con La Formación Agua Nueva de la Plataforma Valles-San Luis Potosí.

Formación Agua Nueva

Nombre introducido por Stephenson (1921) y después por Muir, J. M. (1936) para referirse a los sedimentos que descansan directamente sobre la Formación Tamaulipas Superior. Se distinguen dos unidades; la inferior consiste de capas de estratificación gruesa a media (hasta 0.70 m.), que contienen laminaciones de lutita negra quebradiza. La parte media de la sección es más arcillosa, dispuesta en delgadas capas de carácter laminar, en la que las lutitas negras contienen impresiones de *Inoceramus Labiatus*. La parte superior muestra graduación a rocas de la Formación San Felipe y consiste de calizas de estratificación media y delgada.

El espesor de la sección tipo es de 127 m. Se correlaciona con la Formación Indidura del NE de México y con la Formación Eagle Ford en el NE de México.

Formación Caracol

Fue descrita por Imlay (1937) como tobas desvitrificadas, lutita y caliza en menor proporción que sobreyacen a la Formación Indidura, en la parte media de la Sierra de Parras, Coahuila. Consiste principalmente de una secuencia de capas de estratificación mediana a delgada de calizas y lutitas de color gris oscuro con bandas de pedernal de color gris a negro, que intemperizan a color amarillo ocre y rojizo.

Su constitución litológica es muy variable debido a que posiblemente su depósito comprendió facies diferentes. Se caracteriza por la presencia de calizas con lutitas; las calizas corresponden a micritas arcillosas recristalizadas de color gris claro, que en roca fresca presenta un color negro, textura wackestone y vetas de calcita. Su estratificación ondulante indica una depositación en aguas de profundidad moderada que se encontraban sujetas a cierta agitación en un ambiente infranerítico.

El espesor de esta unidad puede alcanzar hasta 900 m en el valle de Mazapil (ubicado en el acuífero vecino al oeste Cedros), cubriendo concordante y transicionalmente a la Formación Indidura, mientras que es cubierta por rocas volcánicas y sedimentarias cenozoicas. Su ambiente de depósito es de plataforma, relativamente profunda con desarrollo de facies arrecifales. Se correlaciona con la Formación San Felipe del Noreste de México y con la Formación Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí. Por su posición estratigráfica y contenido fósil, se le asigna una edad Albiano-Cenomaniano. Afora en la porción central del acuífero, en las sierras el Orégano y El Gateado, conformadas por una serie de anticlinales y sinclinales recumbentes.

Formación San Felipe

Esta formación fue descrita inicialmente por Jeffreys en 1910, en su localidad tipo de la ranchería de San Felipe, San Luis Potosí, ubicada a 6 km al este de Ciudad Valles, donde consiste de calizas arcillosas de colores gris claro y verde, con frecuentes intercalaciones de lutitas bentoníticas de colores verde y gris claro. Son típicos los intervalos de calizas moteadas con manchas ovaladas oscuras que pueden ser debidas a la presencia de algas.

Está constituida por una secuencia rítmica de calizas arcillosas de color gris claro y lutitas calcáreas color café, que presentan intercalaciones de calizas arcillosas, margas de color gris y verde, así como bentonita, que hacia su cima desaparece la presencia de estratos calcáreos.

Subyace a la Formación Méndez cuyo contacto es transicional y sobreyace a la Formación Agua Nueva en forma concordante. Sus afloramientos presentan una gran área de exposición sobre el flanco oriental de la Sierra Madre Oriental, en forma de una serie de pequeños anticlinales y sinclinales, así como en el flanco poniente de la sierra de Tamaulipas. Su espesor promedio es de 130 m y se correlaciona con las formaciones Parras en el estado de Coahuila, Tamasopo de la Plataforma Valles-San Luis Potosí e Indidura de la cuenca del Centro de México.

Formación Méndez

Definida por Jeffreys en 1910, es el nombre que se utilizó para describir a una serie de lutitas calcáreas de colores gris y café con fractura nodular, que sobreyace a la Formación San Felipe. Su localidad tipo se ubica sobre el km 62 de la vía del ferrocarril Tampico-San Luis Potosí, a 300 m al este de la estación Méndez.

Está constituida por una serie de lutitas calcáreas de colores gris azulado y café, con fractura nodular y concoidal, con aislados estratos de areniscas de grano fino color café, que cubren discordantemente a los conglomerados y depósitos aluviales. Su fracturamiento es típico por el intemperismo, produciéndose un intenso lajamiento y pizarrosidad, que da origen a montículos con apariencia de dunas, subyace discordantemente a los conglomerados y/o depósitos aluviales. Su espesor promedio es de 300 m. En la Cuenca de Parras se correlaciona con el Grupo Difunta.

TERCIARIO

Conglomerado Polimíctico del Neógeno

Estos depósitos conglomeráticos se depositaron durante el periodo Mioceno-Plioceno en un ambiente continental, al pie de los terrenos recién emergidos. Se cree que durante la acumulación de este potente depósito, la región septentrional del área se comportaba tectónicamente inestable, debido a la dinámica de un sistema de fallas de desplazamiento lateral que actuaba en dicho sector, ocasionando la acumulación de un prisma relativamente potente de clásticos conglomeráticos.

Está constituido por fragmentos de rocas sedimentarias de composición variada, que están empacados en una matriz limo-arenosa, con un grado de compactación que varía de moderado a alto, pero que no están cementados, por lo que más que constituir un conglomerado, forman un paquete de gravas y boleos compactados. Se distribuyen ampliamente en el área.

CUATERNARIO

Sedimentos Lacustres

Los valles y bolsones que constituyen las partes topográficamente más bajas de la zona están constituidos por sedimentos lacustres, que en la zona donde existen lagunas efímeras se asocian a sales evaporíticas.

Están constituidos por limos y arcillas de grano fino a grueso, pobremente consolidados, gradados, con lentes conglomeráticos e intercalaciones de sales de sodio y potasio.

Aluvión

Los materiales que constituyen esta unidad se encuentran rellenando las depresiones, generalmente sinclinales, como llanuras de piedemonte y llanuras aluviales que forman los rellenos de cuencas cerradas, denominadas bolsones.

En general los aluviones se presentan como una mezcla de materiales de granulometría fina a gruesa, con una disposición heterogénea, en la cual superficialmente están sueltos y con una consolidación moderada a profundidad. Su espesor en algunos sitios alcanza 100 m; localmente se presentan también pequeños depósitos de terrazas aluviales con espesores de 10 a 20 m.

4.2 Geología estructural

La geología estructural en el área que ocupa el acuífero es muy compleja, debido a que es una región que ha estado sujeta a diversos procesos geológicos de tipo regional, que tuvieron como consecuencia la ruptura y sobreposición de las rocas.

Las estructuras dominantes fueron generadas por esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide; como resultado de esta deformación se presenta una gran cantidad de pliegues que varían en orientación de prácticamente N-S en la porción sureste del acuífero, a NW-SE en los sectores poniente y norte.

Posteriormente en el Terciario se generaron una gran cantidad de fallas normales con orientación NW-SE; estas fallas dislocaron a las rocas que por las deformaciones previas ya tenían una gran complejidad estructural; esta nueva etapa tectónica formó las fosas tectónicas en que se acumularon los sedimentos, que posteriormente fueron saturados formando los acuíferos en materiales granulares. Esta complejidad estructural, caracterizada por la presencia de pliegues recostados, fallas inversas, de desplazamiento horizontal y fallas normales, ocasiona que las rocas cretácicas y jurásicas pierdan su continuidad en el subsuelo, dificultando establecer la forma en que se recargan las unidades acuíferas.

A nivel regional, las estructuras más importantes fueron generadas por los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide mientras que durante las etapas de fallamiento distensivo ocurrieron durante el Terciario. Se observan dos direcciones en las estructuras principales: NW-SE y NE-SW. La forma arqueada de los pliegues se generó durante la Orogenia Laramide cuando las rocas del Mesozoico se deslizaron hacia el nororiente sobre las evaporitas y lutitas del Mesozoico Inferior que fueron plegadas y cabalgadas contra y sobre las Islas de Coahuila y San Carlos, produciendo así la vergencia general de las estructuras hacia el norte y nororiente. La falla lateral izquierda San Tiburcio cruza la región de surponiente a norponiente, con rumbo NW-SE, en una longitud aproximada de 100 km.

Se identifican tres fajas: la faja de sierras y valles, la faja de sierras y llanuras y la faja mineral; las cuales representan una sucesión progresiva de la deformación asociada en parte al fallamiento, enmarcado dentro del terreno tectonoestratigráfico Sierra Madre (Carta Geológico-Minera Concepción del Oro G14-10, escala 1:250,000. SGM, 2000).

Las estructuras presentes en la región se dividen en seis grandes zonas: Zona Centro-Oriental (Curvatura de Monterrey), con pliegues simétricos cuyos planos axiales son casi verticales, zonas de transferencia, fallas, cabalgaduras y bifurcación de estructuras.

Zona Norte-Oriental (Isla de San Carlos), constituida por un anticlinal simétrico en sus extremos, recostado en su porción central y afectado por una cabalgadura con vergencia al NE. Zona Centro-Norte (Golfo de Sabinas), conformada por una serie alineada de pliegues, anticlinales y sinclinales orientados preferentemente al NW-SE.

Zona Centro-Occidental (Cuenca de Parras) en la que las estructuras dominantes son sinclinales simétricos con orientación sensiblemente paralela al frente (Napa de Parras) de la Sierra Madre Oriental. Zona Norte-Occidental (Isla de Coahuila), caracterizada por su forma semicircular, refleja la presencia de un posible cuerpo batolítico a profundidad. Zona Sur Occidental (Sector Transverso), constituida por una serie de anticlinales y sinclinales orientados en sentido E-W y una cabalgadura importante en su parte frontal.

Algunos autores proponen que los pliegues del noreste de México son el resultado de la combinación de un despegue con dirección suroeste-noreste y de esfuerzos de cizalla sinestrales donde las fallas La Babia y San Marcos se reactivaron durante el Terciario Temprano, provocando un giro de los anticlinales en el Golfo de Sabinas.

La tectónica del noreste de México puede explicarse dentro del marco tectónico del desarrollo del Golfo de México, que se caracteriza por haber sido un margen de placas divergente durante el Mesozoico, originando varias cuencas por ruptura de la Pangea (Carta Geológico-Minera Monterrey G14-7, escala 1:250,000. SGM, 2008).

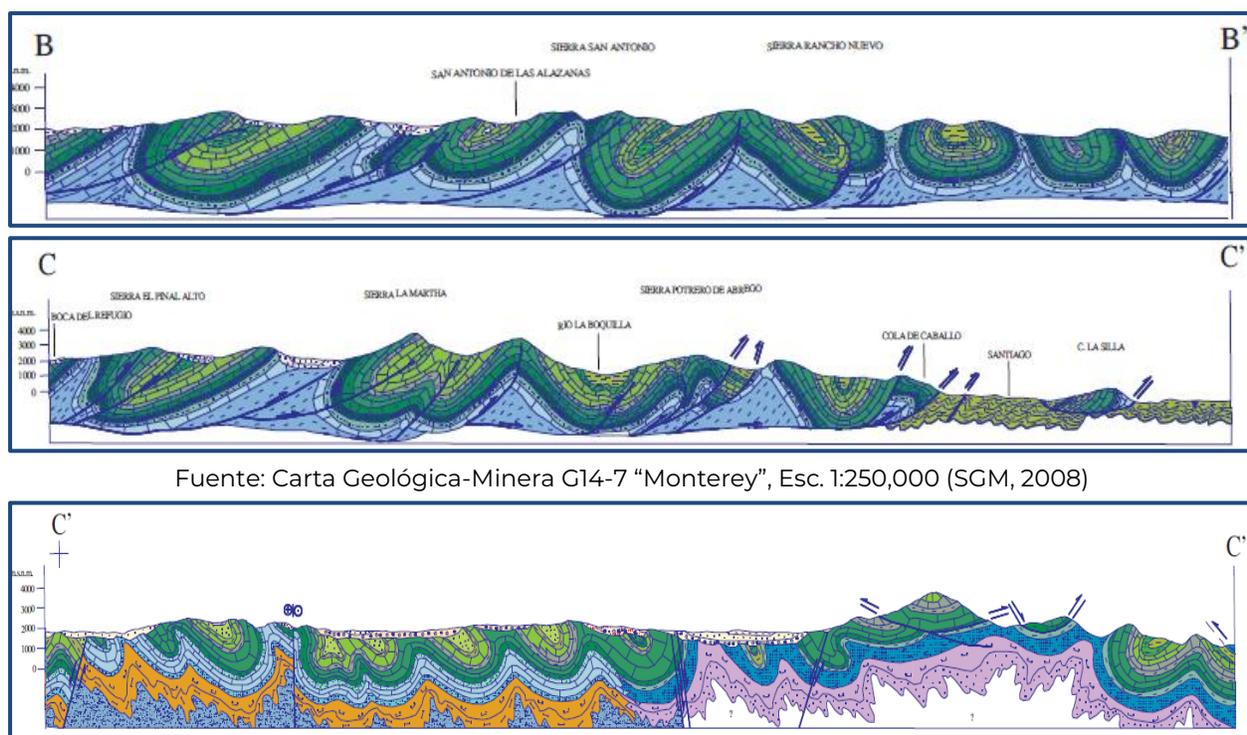
4.3 Geología del subsuelo

De acuerdo con la información de la geología superficial y la correlación con otros acuíferos vecinos en la región, es posible definir el acuífero se encuentra alojado y constituido en su porción superior por sedimentos aluviales y coluviales heterogéneos producto de la erosión de las partes altas de las sierras, que han sido transportados por abanicos aluviales y por escurrimientos superficiales para ser depositados en los cauces de los arroyos y las planicies, así como conglomerados, cuyo espesor es mayor de 250 m en la porción central del valle debido a la existencia de fosas tectónicas delimitadas por fallas inversas.

La porción inferior es un medio fracturado que está constituido por lutitas y lutitas calcáreas alteradas, que junto con la unidad superior forman un acuífero de baja permeabilidad y de reducida capacidad de almacenamiento. A mayor profundidad esta unidad presenta sedimentos limo-arcillosos que le ocasionan condiciones de semiconfinamiento y confinamiento. Los sedimentos granulares y conglomerados polimícticos, de granulometría variada, le confieren permeabilidad media a alta al acuífero, como lo demuestran los caudales de 15 a 80 lps de los pozos perforados en los valles aluviales.

La secuencia de rocas carbonatadas del Cretácico Inferior y Jurásico Superior constituye un acuífero de alta permeabilidad que ha demostrado su potencial en otros acuíferos vecinos y que al estar sobreyacida por rocas arcillosas, presenta condiciones de semiconfinamiento y confinamiento. Las fronteras y barreras al flujo subterráneo, así como el basamento geohidrológico del acuífero, están representadas por las mismas rocas sedimentarias cuando se presentan inalteradas y al desaparecer el fracturamiento, así como por lutitas y areniscas. A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de calizas arcillosas y lutitas del Cretácico Inferior y Jurásico.

En la figura 3 se presenta una sección geológica esquemática que muestra la compleja geología estructural de la región y la delgada capa de sedimentos aluviales y coluviales que se depositaron en los anticlinales.



Fuente: Carta Geológica-Minera G14-7 "Monterey", Esc. 1:250,000 (SGM, 2008)

Fuente: Carta Geológica-Minera G14-10 "Concepción del Oro", Esc. 1:250,000 (SGM, 2000)

Figura 3. Secciones Geológicas Esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir la presencia de un acuífero de **tipo libre**, heterogéneo y anisótropo, constituido por un medio granular y otro fracturado.

La porción superior está conformada por sedimentos aluviales y coluviales de granulometría variada, así como conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar más de 250 m en el centro de los valles; así como por sedimentos limo-arcillosos a mayor profundidad, que le confieren condiciones de semiconfinamiento y confinamiento.

La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias, principalmente lutitas de la Formación Méndez, cuando presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua en la región.

La secuencia de **rocas carbonatadas** del Cretácico Inferior y Jurásico Superior constituye un acuífero de alta permeabilidad que ha demostrado su potencial y que al estar sobreyacida por rocas arcillosas, presenta condiciones de **semiconfinamiento y confinamiento**.

5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de las actividades del estudio realizado en el 2014, se ejecutaron 4 pruebas de bombeo de larga duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente se recopiló información de 23 pruebas más realizadas en estudios previos.

De su interpretación por métodos analíticos convencionales se determina que los valores medios de transmisividad varían entre **2.8×10^{-4}** y **$21.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** , con un valor promedio de **$15.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores de conductividad hidráulica varían de **6.4×10^{-6}** y **$9.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$** (**0.6 a 79.5 m/d**), con un valor promedio de **$2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$** (**20.7 m/d**).

Ninguna prueba de bombeo contó con pozo de observación, por lo que no fue posible estimar el valor del coeficiente de almacenamiento. De acuerdo a la granulometría de los depósitos, para el balance de agua subterránea se adoptaron valores de rendimiento específico entre 0.1 y 0.01.

Los valores más bajos de los parámetros corresponden a sedimentos o rocas arcillosas sin fracturamiento, en tanto que los más altos se asocian a sedimentos de mayor granulometría y rocas fracturadas.

5.3 Piezometría

Para el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, se cuenta con la información de estudios previos así como la piezometría recabada por el Organismo de Cuenca Río Bravo de la Comisión Nacional del Agua para varios años. Para el balance de aguas subterráneas se eligió el periodo 2000-2014, que es el que tiene mayor cantidad de información y mejor cobertura espacial.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático para el año 2014 muestra que los valores variaron, de manera general, de 20 a 140 m, los cuales se incrementan por efecto de la topografía hacia las estribaciones de las sierras que limitan los valles.

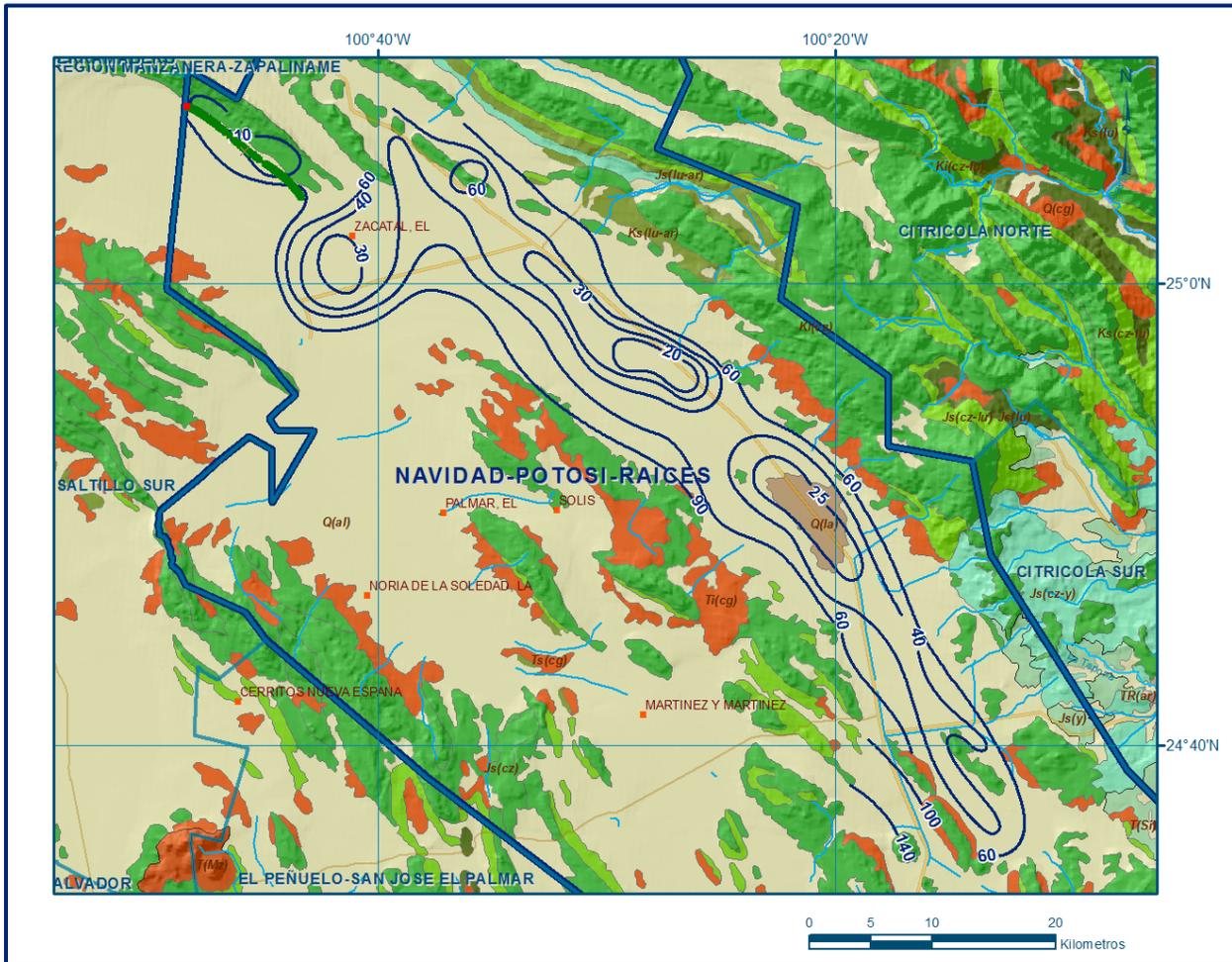


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2014)

En la superficie restante de los valles, los valores varían de 1820 a 1880, incrementándose por efecto topográfico desde la porción central hacia las estribaciones de las sierras que los delimitan. El flujo subterráneo es radial y concéntrico hacia las zonas donde se concentra la extracción para uso agrícola, como en la zona ubicada entre San Rafael y El Cuije, y/o las zonas topográficamente más bajas, como sucede en la región localizada al oeste de El Potosí. Las cuencas son endorreicas, por lo que no existen salidas subterráneas hacia los acuíferos vecinos (figura 5).

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2000-2014 registró valores de abatimiento para la mayor parte de la zona de explotación, que varían de 1 a 15 m, con un promedio anual de 0.4 m; y valores puntuales de 20 y 30 m. Los mayores abatimientos, de 0.5 a 1.0 m anuales, se registran en la zona de extracción para uso agrícola, ubicada entre San Rafael y San Juan del Prado, y en la porción central del valle, entre los poblados El Potosí y Entronque San Roberto (figura 6).

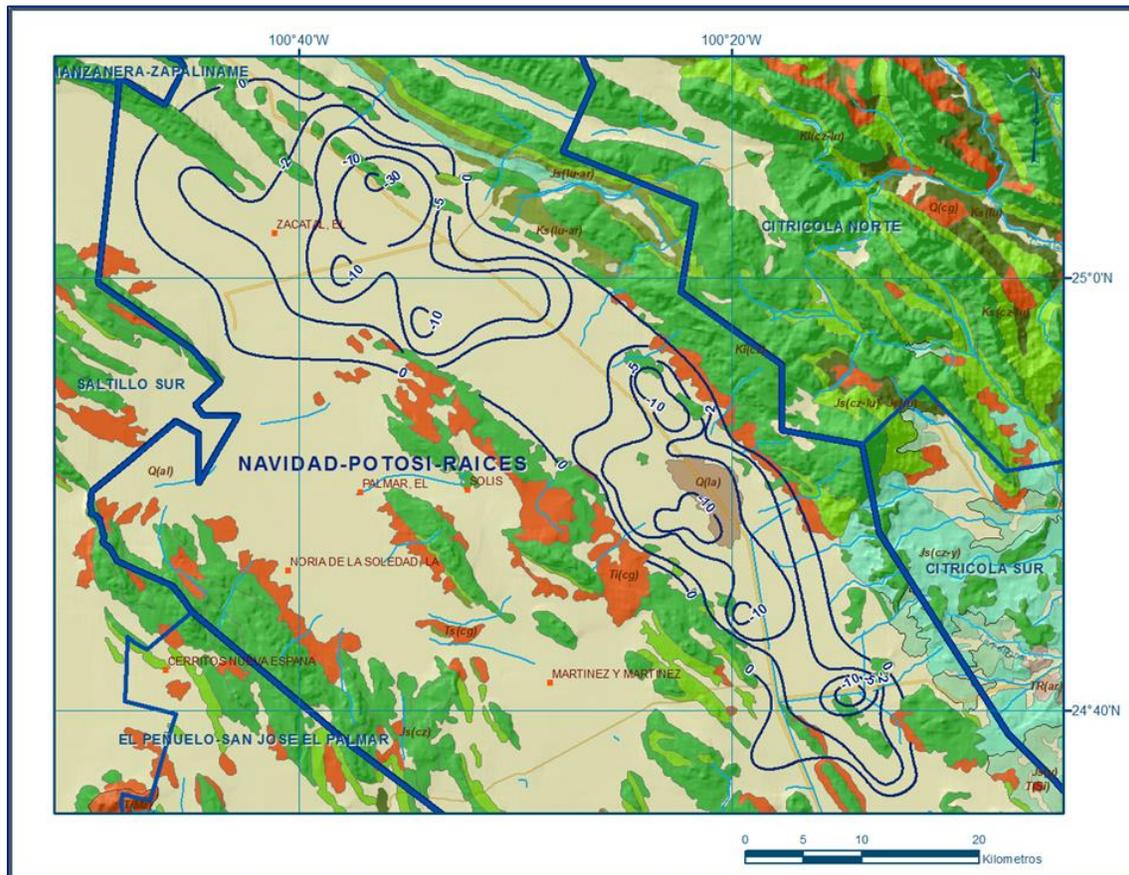


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2000-2014)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

La información histórica de salinidad del agua subterránea procedente de estudios previos, revela que la concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) presenta valores extremos de 200 a 6000 mg/l, aunque los valores más frecuentes fluctúan entre 250 y 2000 ppm. Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2014, se realizaron mediciones *in situ* de la conductividad eléctrica y a partir de ellas se obtuvo de manera indirecta la concentración de STD que representan. De acuerdo con los resultados obtenidos, se define que los valores de concentración de STD varían de menos de 1,000 a 4,000 mg/l.

En la mayoría de las muestras de agua se presentan concentraciones que superan el límite máximo permisible de 1000 ppm establecido por la Modificación a la 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. de STD, para el agua destinada al consumo humano.

En cuanto a la conductividad eléctrica, de manera general, el agua se clasifica como dulce a salobre, de acuerdo al criterio establecido por la American Public and Health Association (APHA, 1995), ya que se registraron valores de 1600 a 6800 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

De acuerdo a las concentraciones de salinidad, el número de muestras que las presentaron y las unidades geológicas que aportan el agua subterránea, es posible inferir que las familias de agua dominantes en la región son la sódica-sulfatada, sódico-clorurada y cálcica-bicarbonatada; las dos primeras asociadas a la presencia de yesos y/o a la existencia de suelos salinos debido a la concentración de sales por evaporación en las zonas de acumulación de los escurrimientos superficiales.

El agua de mejor calidad, de la familia cálcica-bicarbonatada, se presenta hacia las estribaciones de las sierras que delimitan los valles, especialmente donde afloran las rocas calcáreas del Cretácico Inferior; en tanto que las concentraciones más altas de salinidad se presentan en las partes más bajas de los valles o donde se extrae agua de las formaciones jurásicas que contiene yesos. De igual manera, es posible inferir que, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua subterránea de la región presente con mayor frecuencia contenidos medios a altos de sales (C_2S_1) y concentración baja a media de sodio intercambiable (C_3S_2).

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 año 2014, se registraron un total de 551 obras que aprovechan el agua subterránea, todos ellos pozos; de los cuales 293 están activos y 258 se consideraron inactivos. De los pozos activos, 255 (87.0%) se destinan al uso agrícola, 18 (6.1%) al uso público-urbano, 5 (1.7%) más para uso pecuario, 3 para servicios (1.0%), 7 (2.5%) para uso doméstico y 5 (1.7 %) para usos múltiples. El volumen de extracción asciende a **92.0 hm³ anuales**, de los cuales 89.1 hm³ (96.8%) se destinan al uso agrícola, 0.4 hm³ (0.4 %) se utilizan para uso público-urbano, 0.6 hm³ (0.7 %) son destinados a las necesidades del uso doméstico-pecuario y 1.9 hm³ (2.1 %) para usos múltiples

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo 2000-2014, en una superficie de **1,005 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 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 del 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, 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 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 agua destinada al uso agrícola, que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela; del agua residual de las descargas urbanas y de las pérdidas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero (Ri). Para este caso, debido a que el volumen utilizado para uso público-urbano es incipiente, solo se considera la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr).

7.1.1 Recarga vertical (Rv)

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene 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:

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

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal

Rr: Recarga Incidental por retornos de riego

B: Bombeo

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

De esta manera, despejando la recarga vertical, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Rv = B \pm \Delta V(S) - Eh - Rr \quad (2)$$

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 de los 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. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2014 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

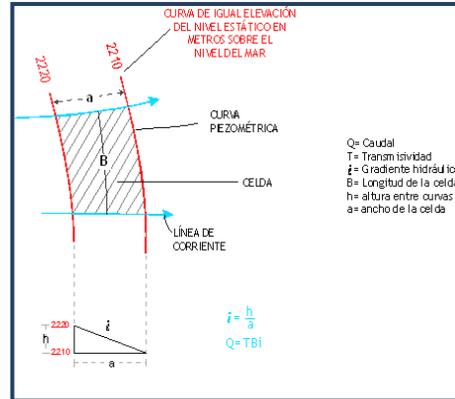
Donde:

Q= Gasto;

T= Transmisividad;

B= Longitud de la celda;

i= Gradiente hidráulico;



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 asciende a **33.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal (2014)

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente e i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN N (hm ³ /año)
E1	10770	1280	20	0.0156	0.0008	0.1346	4.2
E2	5130	2565	10	0.0039	0.0015	0.0300	0.9
E3	2050	2820	10	0.0035	0.0015	0.0109	0.3
E4	8460	1540	10	0.0065	0.0015	0.0824	2.6
E5	5640	1280	10	0.0078	0.0015	0.0661	2.1
E6	10255	1025	10	0.0098	0.0015	0.1501	4.7
E7	2305	1795	10	0.0056	0.0015	0.0193	0.6
E8	2565	1280	10	0.0078	0.0015	0.0301	0.9
E9	5385	1540	10	0.0065	0.0015	0.0525	1.7
E10	7180	2305	10	0.0043	0.0015	0.0467	1.5
E11	2565	6410	10	0.0016	0.0015	0.0060	0.2
E12	4615	1950	10	0.0051	0.0015	0.0355	1.1
E13	4360	1640	10	0.0061	0.0015	0.0399	1.3
E14	11280	1435	10	0.0070	0.0015	0.1179	3.7
E15	5640	3075	10	0.0033	0.0015	0.0275	0.9
E16	4870	2565	10	0.0039	0.0015	0.0285	0.9
E17	4360	2820	10	0.0070	0.0010	0.0304	1.0
E18	9230	1280	10	0.0035	0.0008	0.0262	0.8
E19	8460	2050	10	0.0078	0.0015	0.0991	3.1
E20	5640	3075	10	0.0049	0.0015	0.0413	1.3
TOTAL						33.8	

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 realizadas en estudios previos, adaptados al espesor saturado de cada zona.

7.1.3 Recarga inducida (Ri)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, se infiltra y eventualmente alcanza la superficie freática, dependiendo de 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 de láminas de riego por cultivo, se consideró que un 10% del volumen aplicado al uso agrícola retorna al acuífero en forma de recarga incidental, tomando en cuenta la profundidad al nivel del agua subterránea mayor a 40 m en la zona agrícola y la presencia de estratos de permeabilidad media a baja en el subsuelo. De esta manera si el volumen para uso agrícola es de 89.1 hm³ anuales, el retorno agrícola es de 8.9 hm³ anuales. **Ri = 8.9 hm³ anuales**

7.2 Salidas

La descarga del acuífero ocurre únicamente por bombeo (B).

7.2.1 Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **92.0 hm³ anuales**.

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔVS)

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 2000-2014 (figura 6). Con base en ella y valores de coeficiente de almacenamiento de 0.01, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de **1,005 km²**, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

ΔV(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 2000-2014 se pueden observar en la tabla 3. El volumen anual del cambio de almacenamiento calculado es de **-3.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo del volumen de cambio de almacenamiento (2000-2014)

Evolución (m)	Abatimiento medio (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
0 a -2	-1	411.0	0.01	-4.1
-10	-10	36.6	0.01	-3.7
-10 a -30	-20	39.1	0.01	-7.8
-2 a -5	-7.5	284.5	0.01	-21.3
-5 a -10	-3.5	233.8	0.01	-8.2
Área de balance		1005.0	TOTAL	-45.1
Promedio anual				-3.2

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:

$$R_v = B \pm \Delta V(S) - E_h - R_r$$

$$R_v = 92.0 - 3.2 - 33.8 - 8.9$$

$$R_v = 46.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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

$$R = R_v + E_h + R_r$$

$$R = 46.1 + 33.8 + 8.9$$

$$R = 88.8 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero. Para este caso, su valor es de **88.8 hm³/año**.

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, su valor 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 (REPGA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **158,470,040 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) 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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 88.8 - 0.0 - 158.470040 \\ \text{DMA} &= -69.670040 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **69,670,040 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2007. Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Navidad-Potosí-Raíces, estado de Nuevo León.

Comisión Nacional del Agua, 2014. Estudio de Actualización Geohidrológica de los Acuíferos 1906, Área Metropolitana de Monterrey; 1912 Citrícola Norte; 1916 Navidad-Potosí-Raíces, en el estado de Nuevo León. Realizado por Moro Ingeniería, S.C.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) 1977. Estudios Agrológicos y Geohidrológicos de la Zona El Cuije-Potosí-Raíces del estado de Nuevo León. Realizado por Ingeniería y Geotecnia, S.A.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1979. Servicios de Prospección y Levantamientos Geológicos en la Zona de Galeana, estado de Nuevo León. Realizado por Hidrogeología, S.A.