



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS (0501),
ESTADO DE COAHUILA**

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	6
3. FISIOGRAFÍA.....	10
3.1 Provincia Fisiográfica	10
3.2 Clima.....	10
3.3 Hidrografía	11
3.4 Geomorfología.....	11
4. GEOLOGÍA	12
4.1 Estratigrafía	12
4.2 Geología Estructural	21
4.3 Geología del Subsuelo.....	22
5. HIDROGEOLOGÍA.....	24
5.1 Tipo de Acuífero.....	24
5.2 Parámetros hidráulicos.....	24
5.3 Piezometría	25
5.4 Comportamiento hidráulico.....	25
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	25
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	26
5.4.3 Evolución del nivel estático	27
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	28
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	29
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 por retornos de riego (Rr)	32
7.1.4 Recarga artificial (Ra).....	33
7.1.5 Infiltración en canales (Ic)	33
7.2 Salidas.....	33
7.2.1 Evapotranspiración (ETR).....	33
7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)	35
7.2.3 Bombeo (B).....	35
7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb).....	35
7.2.5 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)	36
7.3 Cambio de almacenamiento ($\Delta V(S)$).....	36
8. DISPONIBILIDAD	38
8.2. Descarga natural comprometida (DNC).....	38
8.3. Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)	39
8.4. Disponibilidad media anual de aguas subterráneas (DMA).....	39
9. BIBLIOGRAFÍA	41

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 Allende-Piedras Negras, definido con la clave 0501 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción nororiental del Estado de Coahuila, entre las coordenadas 27°54' y 29°00' de latitud norte, 100°00' y 102°13' de longitud oeste, cubriendo una superficie aproximada de 12,961 km². Limita al norte con el acuífero Palestina, al noroeste con los acuíferos Cerro Colorado-La Partida y Serranía del Burro, al oeste y sur con Región Carbonífera, al sureste con el acuífero Hidalgo, todos ellos pertenecientes al Estado de Coahuila; al este su límite natural es al Río Bravo (figura 1).

Geopolíticamente comprende totalmente los municipios Piedras Negras, Allende y Nava; casi la totalidad de Morelos, Villa Unión y Guerrero; parcialmente cubre territorio de Zaragoza y Jiménez, así como porciones menores de Múzquiz, Hidalgo, Sabinas y Acuña.

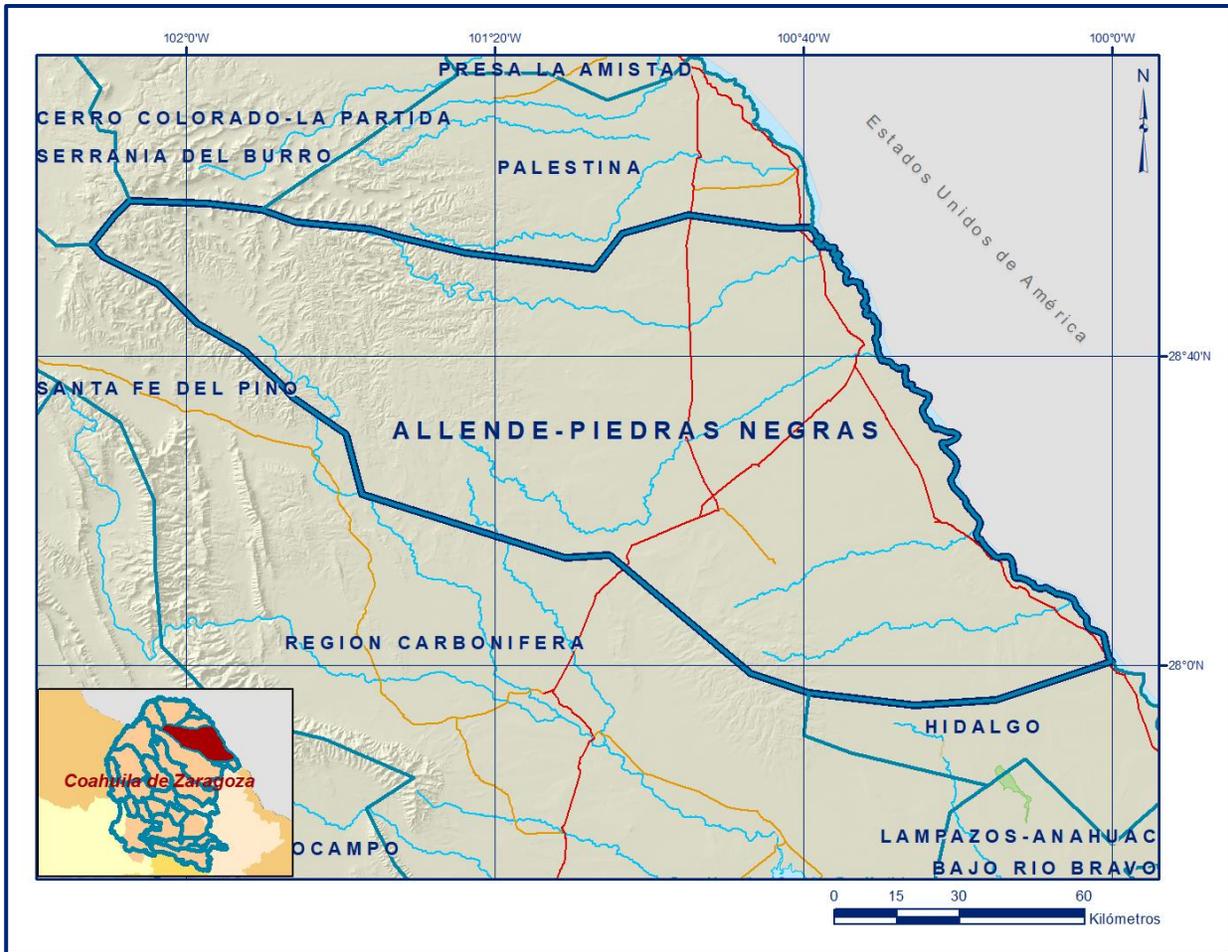


Figura 1. Localización del acuífero

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

ACUIFERO 0501 ALLENDE-PIEDRAS-NEGRAS							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	99	59	59.97	28	0	36.0	
2	100	15	3.9	27	55	37.2	
3	100	25	33.8	27	54	56.0	
4	100	39	17.3	27	56	33.4	
5	100	46	48.5	27	59	13	
6	101	5	6.7	28	14	19.7	
7	101	10	58.8	28	13	57.2	
8	101	37	15.9	28	22	14.6	
9	101	39	18.9	28	29	59.3	
10	101	46	19.6	28	34	47.9	
11	101	47	49.9	28	36	32.9	
12	101	52	35.7	28	40	48.0	
13	101	58	28.9	28	44	17.6	
14	102	3	43.7	28	49	24.0	
15	102	10	52.2	28	52	58.7	
16	102	12	16.4	28	54	33.3	
17	102	9	10.2	28	58	29.5	
18	102	7	20.3	29	0	8.5	
19	101	57	17.3	28	59	51.1	
20	101	50	19.2	28	59	4.6	
21	101	45	48.1	28	57	24.6	
22	101	36	6.7	28	56	32.4	
23	101	32	32.1	28	55	25.7	
24	101	23	46.9	28	53	27.0	
25	101	7	3.8	28	51	24.5	
26	101	3	33.9	28	55	57.0	
27	100	54	57.5	28	58	20.5	
28	100	43	0.4	28	56	35.3	
29	100	39	18	28	56	46.5	DEL 29 AL 1POR EL LIMITE INTERNACIONAL
1	99	59	59.97	28	0	36.0	

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

1.2. Situación Administrativa del Acuífero

El acuífero Allende-Piedras Negras pertenece al Organismo de Cuenca VI “Río Bravo” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Coahuila.

En su territorio completo no rige ningún decreto de veda para la extracción de agua subterránea.

Sin embargo, se encuentra sujeto a las disposiciones del “ACUERDO General por el que se suspende provisionalmente el libre alumbramiento de las aguas nacionales del subsuelo en los 96 acuíferos que se indican”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 5 de abril de 2013, a través del cual en el acuífero, no se permite la perforación de pozos, la construcción de obras de infraestructura o la instalación de cualquier otro mecanismo que tenga por objeto el alumbramiento o extracción de las aguas nacionales del subsuelo, sin contar con concesión o asignación otorgada por la Comisión Nacional del Agua, quien la otorgará conforme a la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. Su territorio pertenece al Consejo de Cuenca Río Bravo, instalado el 21 de enero de 1999.

Dentro de la superficie cubierta por el acuífero no existen distritos de riego, pero sí una gran cantidad de unidades de riego, las más importantes se abastecen de los manantiales de la región. Entre estas, destacan 20 Unidades de Riego para el Desarrollo Rural (URDERAL) registradas por la Unidad de Programación de la Dirección Local de la CONAGUA en Coahuila.

En el municipio de Guerrero, destacan las unidades Santa Mónica I, Guadalupe, Guerrero y Santa Mónica II; en el municipio de Morelos, la unidad Las Corrientes; en el municipio de Nava una con el mismo nombre “Nava”; en el municipio de Villa Unión: La Azufrosa, Villa Unión, La Luz, Santa Ana, General Naranjo, Palmira y El Potrero; en el municipio de Zaragoza: Patiños, San Ildefonso, El Remolino y La Zanja; por último, en el Municipio de Allende las unidades de riego Allende, La Liebre y Palomas.

Estas Unidades agrupan a 1023 usuarios (CONAGUA, 2001) que utilizan un caudal de 11,160 lps que son conducidos desde los manantiales mediante un sistema de canales cuya extensión total es 5,828 km de longitud, de los cuales 35 km están revestidos y 5,793 km no tienen revestimiento.

El usuario principal del agua subterránea es el agrícola y en menor proporción el uso industrial, para el suministro de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la compañía Minera Carbonífera Río Escondido (MICARE) y la empresa cervecera Grupo Modelo. A la fecha no se ha constituido un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona del acuífero, se han llevado cabo varios estudios hidrogeológicos de evaluación, destacando entre los más recientes los que se mencionan a continuación:

REPORTE SOBRE EL RESUMEN Y EVALUACIÓN DE ESTUDIOS GEOHIDROLÓGICOS REALIZADOS PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS CARBÓN I Y II, MEDIANTE LAS ALTERNATIVAS DE EXPLOTACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO CALIZO DE LA PORCIÓN NORTE DEL ESTADO DE COAHUILA, elaborado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en 1994. Este trabajo, es un resumen de las actividades geohidrológicas realizadas al oriente de la Sierra del Burro. Menciona que la CFE perforó entre los años de 1974 y 1976, 15 barrenos exploratorios hasta una profundidad promedio de 400 metros. Cuatro de ellos en la zona “El Remolino”, en los cuales se reportó alta concentración de sulfatos en el agua; 9 barrenos en la zona denominada “El Refugio-Las Albercas”, donde se encontró agua de buena calidad y; 2 barrenos más al oriente del poblado Zaragoza. En el año 1991 se resume el modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero en calizas, se menciona que la descarga de este acuífero es de 7.7 m³/s y que la recarga por infiltración al acuífero calizo asciende a 17.4 m³/s. Entre 1975 y 1981, se perforaron 4 pozos exploratorios más en el área de “El Refugio-Zaragoza” y para el año 1993 reporta la perforación de los pozos Patiño 1 y El Gallo 1.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL SISTEMA ACUÍFERO EN CALIZAS DE LA PORCIÓN NORTE DEL ESTADO DE COAHUILA, elaborado por la CFE en 1998. Dentro del presente se mencionan las actividades realizadas por la CFE, principalmente la perforación de barrenos y pozos en la zona de “El Refugio-El Remolino”. Incluye también la descripción del comportamiento de las descargas de los manantiales y su relación con la precipitación pluvial, así como el comportamiento piezométrico de pozos piloto ubicados al poniente de Zaragoza.

ACTUALIZACIÓN Y EVALUACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS (ZONA MICARE), COAHUILA, elaborado por Lesser y Asociados,

S. A. de C. V. para la Comisión de Aguas y Saneamiento de Coahuila, 2002. Se obtuvieron datos piezométricos en 148 pozos ubicados entre Zaragoza, Nava, Guerrero y Piedras Negras. La información obtenida se procesó con el objeto de determinar el efecto producido por la construcción y el “achique” de agua que se llevaba a cabo en el tajo III de la empresa Minera Carbonífera Río Escondido (MICARE) por la explotación de carbón, con el objeto de conocer la posible afectación en el rendimiento de los pozos ubicados en la zona agrícola-ganadera, localizada aguas abajo de la zona donde se excavaron los tajos para la explotación mineral. Se identificó la dirección del flujo subterráneo y se cuantificó su magnitud.

Menciona que el acuífero alojado en los depósitos de conglomerados de la planicie, es recargado por la infiltración del agua de los grandes manantiales que existen en la zona comprendida entre Nava y Allende.

ESTUDIO SOBRE REACTIVACIÓN DE REDES DE MONITOREO DEL ÁREA ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, elaborado por la CNA, 2000. Lleva a cabo la medición de los niveles estáticos en pozos piloto; con base en ella y la información histórica elabora configuraciones de profundidad y elevación del nivel estático.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA POTENCIALIDAD DEL ACUÍFERO DEL ÁREA ENTRE ZARAGOZA Y LAS ALBERCAS, COAH., elaborado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V. para el Grupo Modelo, 2003. Realizó un estudio geohidrológico que incluyó la descripción del funcionamiento de los acuíferos y un balance geohidrológico, para determinar su potencialidad como fuente de abastecimiento para satisfacer las necesidades de agua del Grupo Modelo. Se censaron 127 aprovechamientos de agua subterránea, una parte de ellos ubicados al pie de la Sierra del Burro que no habían sido considerados en trabajos previos. Se realizaron también análisis químicos, pruebas de bombeo y se calculó la recarga y volumen almacenado en el acuífero calizo. Se incluyen datos de 15 pozos artesianos y 8 manantiales. Concluye que el acuífero se recarga por agua de lluvia que se infiltra en la sierra y se descarga a través de los manantiales que tienen un gasto medio histórico de 7.7 m³/año.

BALANCE GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, COAH., elaborado por COPEI Ingeniería, S. A. de C. V. para MICARE, 2006. Este trabajo tuvo por objeto actualizar el balance geohidrológico del acuífero Sabinas-Reynosa, entre el Río Escondido y el Arroyo Castaños, identificar el origen del agua y actualizar el conocimiento de los volúmenes que descargan los manantiales.

Llevó a cabo un análisis estadístico de la climatología, que identificó la presencia de periodos de estiaje entre 1995 y 2002, y periodos húmedos del 2003 al 2005. Menciona dos sistemas hidrogeológicos detectados en estudios previos, el primero en rellenos aluviales de la Formación Sabinas-Reynosa y el segundo alojado en las calizas que constituyen la Sierra del Burro.

Calcula que el sector agropecuario utiliza 30 hm³/año, que la CFE tiene una concesión de 27 hm³/año, aunque solo utiliza el 18% y MICARE 48 hm³/año, aunque de manera temporal ya que posteriormente los infiltra al subsuelo. Señala que se extraen del subsuelo 90 hm³/año. Calculó el volumen de infiltración, para el área de balance, de 67.2 hm³/año e indica que dicho volumen corresponde a un coeficiente de infiltración del 8%. Observó una ligera recuperación del nivel estático de 0.7 m anuales durante el periodo 2002-2006. Calcula una entrada subterránea de 87 hm³/año, salidas subterráneas de 55 hm³/año y una recarga vertical de 147 hm³/año.

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA RECARGA, ALMACENAMIENTO Y DESCARGA DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LOS ACUÍFEROS DE LA SERRANÍA DEL BURRO, CERRO COLORADO-LA PARTIDA, PRESA LA AMISTAD, PALESTINA Y ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, EN DIVERSOS MUNICIPIOS DEL ESTADO DE COAHUILA, elaborado por Consultoría BETSCO para la CONAGUA, 2006. Incluyó un censo de 352 aprovechamientos en Allende-Piedras Negras y 48 en la Serranía del Burro, además de 91 captaciones en otras áreas. Realizó el aforo de 12 manantiales, los cuales presentaron caudales entre 161 y 2,199 lps y un análisis parcial del volumen del agua que recarga al acuífero Allende-Piedras Negras; indica que la extracción de agua subterránea mediante pozos era de 54.6 hm³/año y un volumen de descarga de los manantiales de 216.4 hm³/año. Calcula una extracción de 271.0 hm³/año, aunque no comprende la totalidad del acuífero.

ESTUDIO TÉCNICO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, COAHUILA, realizado por Lesser y Asociados, S.A. de C. V. para el Grupo Modelo, 2008. Este estudio realizó una recopilación de los censos de aprovechamientos efectuados en los trabajos previos y complementa esta actividad para cubrir la superficie total del acuífero.

Las actividades de campo tuvieron como objetivo generar información hidrogeológica para el planteamiento del balance de aguas subterráneas: Censo de aprovechamientos, hidrometría, aforo de manantiales, pruebas de bombeo, muestreo de agua subterránea para análisis físico químico, etc. Analiza el impacto que tiene la explotación del agua subterránea, con el objetivo de proponer la reglamentación del acuífero.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO UBICADO EN LOS ALREDEDORES DE LA COMPAÑÍA CERVECERA DE COAHUILA realizado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V. para el Grupo Modelo en 2011. Este estudio tuvo como objetivo determinar la evolución de los niveles del agua subterránea en el periodo 2008-2011 analizando las mediciones piezométricas y la relación extracción-recarga de lluvia; así como la interpretación de la información piezométrica histórica de los pozos de la Compañía Cervecería y su relación con los aforos de los grandes manantiales. El análisis incluye la zona conocida como “Las Albercas”, en la que la empresa tiene localizados actualmente 5 pozos artesianos que abastecen su planta de producción. Concluye que la extracción actual en la zona no afecta el caudal del manantial “Las Ánimas” que es el más cercano a sus instalaciones, pero sí se puede mermar un poco cuando la empresa opere a su máxima capacidad, con un caudal de 1.0 m³/s.

BALANCE GEOHIDROLÓGICO ACUÍFERO ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS, realizado por Lesser y Asociados, S. A. de C. V. en 2012 para Minera del Norte, S.A. DE C.V., Unidad MICARE. Este estudio tuvo como objetivo determinar el grado de recuperación del acuífero al haber concluido la extracción de agua de laboreo del Tajo III. Incluye el aforo de 30 manantiales y analiza las ventajas y desventajas de dejar dicho tajo descubierto, como se encuentra actualmente, o cubierto con el material estéril. Actualiza el balance de aguas subterráneas y concluye que el nivel del agua subterránea se ha restablecido y recomienda dejar descubierto el tajo y establecer medidas de prevención de la contaminación del agua que en él aflora. Los resultados y conclusiones de estos tres últimos estudios fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que se analizan en los apartados correspondientes.

3. FISIOGRAFÍA

3.1 Provincia Fisiográfica

De acuerdo a la clasificación de Manuel Álvarez Jr. (1958), el acuífero se ubica en dos provincias fisiográficas. Una que comprende la región poniente, que corresponde a la Sierra del Burro, que pertenece a la Provincia “Región Montañosa de Coahuila”; mientras que la porción oriental, que comprende la mayor parte del acuífero, se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada “Cuenca del Bravo de la Llanura Costera del Golfo de México”. Por otra parte, de acuerdo con la regionalización fisiográfica del INEGI (1990), la porción occidental se ubica en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Oriental, Subprovincia Serranía del Burro, y la región oriental en la Provincia Fisiográfica Grandes Llanuras de Norteamérica, Subprovincia Llanuras de Coahuila y Nuevo León.

3.2 Clima

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región es semiseco y semicálido. Hacia el oriente de Zaragoza, es de tipo BSohx', que corresponde a un clima seco, semicálido con lluvias escasas todo el año y un porcentaje de lluvia invernal mayor de 18%.

En las estribaciones de la Sierra del Burro, el clima se clasifica como BSohw (x'), que corresponde a un clima seco, semicálido con lluvias en verano y un porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2%. Hacia la planicie el clima es semiseco, semicálido (BS1hx').

De acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas Zaragoza y Allende, la temperatura media registrada en el Atlas del INEGI es de 20.7° y 21.1° C, respectivamente. Las variables climatológicas varían según la altitud de la región, para el caso de la temperatura media anual, se considera que su valor promedio es de 21° C.

La precipitación pluvial en la zona de Allende-Piedras Negras tiene un promedio de 500 mm. Hacia la Sierra del Burro, la precipitación alcanza hasta 626 mm. De acuerdo con los datos de precipitación anual registrada en las estaciones Allende, Zaragoza y Piedras Negras para periodos de 60, 27 y 64 años respectivamente, se obtuvieron precipitaciones medias anuales de 494, 545 y 550 mm, respectivamente para los periodos mencionados.

La evaporación potencial promedio anual varía de 1746 mm, registrada en la estación Allende, a 1816 mm en la estación Observatorio de Piedras Negras.

3.3 Hidrografía

El acuífero se ubica dentro de la región hidrológica RH24, "Río Bravo", Subregión Hidrológica Río Bravo Medio, en la cuenca Río Bravo-Piedras Negras, subcuencas de los ríos San Rodrigo, San Antonio, Escondido y Arroyo Castaños-Arroyo El Amole. Excepto los arroyos Castaños y El Amole, los demás ríos son perennes con un caudal promedio de 2.0 m³/s para el Río San Rodrigo y de 4.0 m³/s para el Río Escondido.

3.4 Geomorfología

La región está constituida por una llanura aluvial ligeramente inclinada al noreste, entre las cotas topográficas de 600 msnm en su parte más alta y 200 msnm en el cauce del Río Bravo. Esta llanura aluvial se encuentra entre el Río Bravo y la vertiente oriental de la zona sur de la Serranía El Burro, así como la vertiente noreste del Lomerío Peyotes.

En el cañón Oso Blanco, localizado en la Serranía El Burro, se presenta el mayor relieve de la zona, ya que en el nacimiento del Río San Rodrigo hay diferencias de alturas hasta de 520 m entre las cimas de las montañas y los lechos de arroyos. En esta zona se presenta la elevación más alta, de 1,500 msnm, en el parteaguas de la sierra. En los flancos sur y oriente de la Serranía El Burro las elevaciones promedio son de 700 msnm; desde donde se incrementan gradualmente hasta los 1,500 msnm de las regiones topográficamente más elevadas.

La Serranía El Burro y el Lomerío Peyotes, que conforman el límite norte de la provincia Sierra Madre Oriental, favorece la recarga de agua subterránea debido a su gran extensión y suave pendiente topográfica. Se distinguen varias unidades geomorfológicas que son: Sierras y valles en el noroeste; sierras alargadas en el suroeste; el anticlinal cóncavo de la Sierra del Burro; lomeríos que bordean el oriente de la sierra y la planicie del Río Bravo.

4. GEOLOGÍA

La geología de la región está representada por rocas sedimentarias marinas del Cretácico que afloran en la Sierra del Burro, que hacia la planicie de Allende-Piedras Negras se encuentran cubiertas por un conglomerado del Terciario y Cuaternario.

La distribución general de las distintas unidades litológicas se muestra en la figura 2.

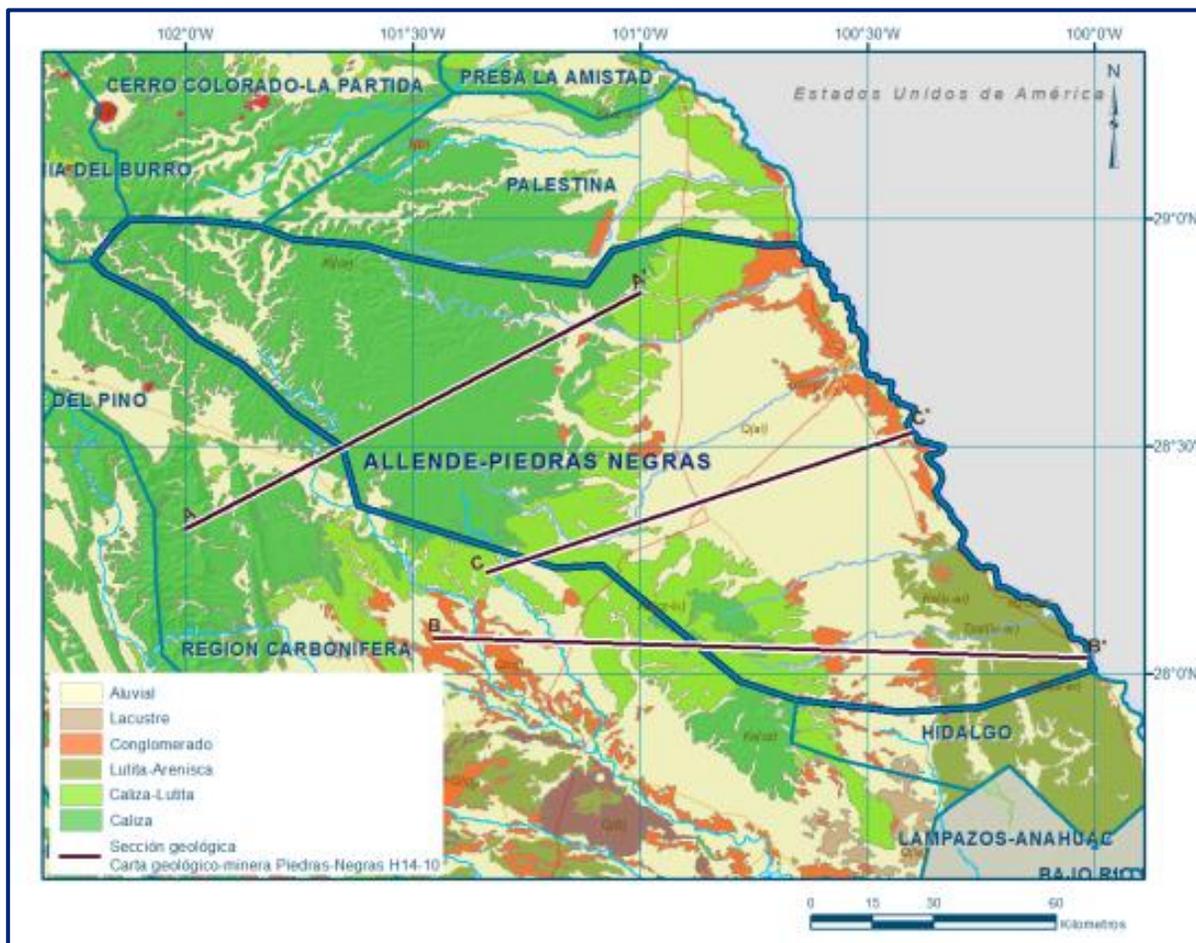


Figura 2. Geología general del acuífero

4.1 Estratigrafía

En la superficie cubierta por el acuífero afloran rocas sedimentarias cuya edad varía del Cretácico Inferior al Reciente. En la Sierra del Burro se presentan las rocas sedimentarias marinas más antiguas, cubiertas en la planicie por conglomerados y aluviones del Terciario y Cuaternario. A continuación, se presenta de manera breve su descripción, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO INFERIOR

Formación La Mula

Representa las rocas más antiguas que afloran en la región. Fue descrita por Imlay en 1940 y renombrada por Humphrey y Díaz en 1956; está constituida por lutitas de coloración rojiza, calizas de estratos medianos, limolitas y calcarenitas oolíticas, que cambian de facies a la Formación La Virgen. Su espesor es del orden de los 650 m.

Formación La Virgen

Nombre propuesto por Humphrey en 1956 para referirse a los yesos, anhidritas y calizas que constituyen esta formación. Las calizas presentan textura fina (mudstone), arcillosas, dispuestas en capas delgadas, que hacia la porción media en ocasiones cambian a un potente cuerpo de caliza grainstone. Hacia la cima, los yesos son más limpios y las capas de caliza menos arcillosas. Se han medido espesores que varían de 335 a 740 m.

Formación Cupido

Sobreyace en contacto transicional con las formaciones anteriores y junto con la Formación Aurora, comúnmente constituye los núcleos de las sierras en el norte de México. En su porción principal, consta de una caliza micrítica, compacta, color gris crema, a veces arcillosa, que hacia la cima presenta estratos de hasta 3 m de espesor de oolitas y calcarenitas con fragmentos de moluscos. Con frecuencia presenta estilolitas.

Formación La Peña

Está representada por calizas arcillosas y fosilíferas, que separan a los potentes bancos de calizas de las formaciones Aurora y Cupido.

Se puede dividir en dos miembros: El inferior está compuesto de capas delgadas a medianas de caliza color gris claro, con nódulos de pedernal y delgadas capas de material arcilloso interestratificado. El miembro superior contiene mayor cantidad del material arcilloso y los estratos de caliza se adelgazan notablemente, hasta tener una apariencia lajosa, presentando transiciones a limolita calcárea. Considerando los dos miembros, su espesor es de 50 m aproximadamente. Representa un horizonte índice tanto por su contenido de fósiles, como por la erosión diferencial que presenta al estar encajonada entre dos grandes cuerpos de calizas masivas.

Formación Aurora

Está constituida por bancos gruesos de calizas mudstone a wackestone de color gris claro, densa y compacta, en estratos de 2 a 4 m, con dolomitización en su parte basal, fractura concoidea y abundantes nódulos de pedernal, sobre todo en las capas superiores, y presencia de estilolitas.

Contiene, aunque no de forma abundante, cristales de pirita y nódulos ferruginosos. Subyace concordantemente a la Formación Kiamichi y de la misma forma sobreyace a la Formación La Peña. De acuerdo al contenido de macrofauna y microfauna, como *Orbitulina texana*, y por su posición estratigráfica, se le ha asignado una edad Albiano Inferior y Medio.

En el elemento paleogeográfico de Peyotes, la caliza de la Formación Aurora cambia de facies a caliza y lutita del Complejo Arrecifal del Burro, cuya unidad más antigua es la Formación Glen Rose.

Complejo Arrecifal del Burro

El nombre de esta unidad fue usado por los geólogos de PEMEX para incluir los sedimentos calcáreos de tipo arrecifal que afloran en la porción central de la Serranía del Burro. Smith 1970, la describe como Formación Devils River. Aflora en una franja orientada en sentido NE-SW en la porción central y suroriental del área estudiada y consiste de un paquete de calizas en estratos muy potentes que contienen corales, rudistas y *Toucasia* sp.

Sus límites superior e inferior son fácilmente reconocibles por erosión diferencial ya que se encuentra encajonada entre formaciones menos competentes que forman pendientes suaves (formaciones Walnut y Del Río). Sus límites laterales no están bien definidos, debido a que representa un cambio gradual de las facies de las formaciones Edwards, Kiamichi y Georgetown hacia el Complejo Arrecifal del Burro. Se distinguen dentro de este complejo, las siguientes formaciones, de la base a la cima: Glen Rose, Walnut, Edwards, West Nueces, Mcknigth y Salmon Peak.

Formación Glen Rose

Definida por Hill en 1891 para referirse a los afloramientos de calizas resistentes y margas suaves, presentes a lo largo del cauce del Río Paluxy, cerca del poblado Glen Rose, Texas.

En la Sierra del Burro, aflora de manera incompleta en el Cañón del Cíbolo, en el Complejo La Cueva y en el cauce del Río Bravo. Su límite inferior no aflora, pero su límite superior con la Formación Walnut es muy claro y se expresa topográficamente por un cambio de pendiente muy marcado y fácil de reconocer por el cambio de litología a margas con abundante *Exogyra* sp., *Gryphaea* sp y braquiópodos, como sucede en el Cañón del Cíbolo.

Formación Telephone Canyon (Walnut)

Nombre propuesto por Hill (1891) para referirse a una secuencia de arcillas amarillentas, calizas laminadas y coquinas que cubren transicionalmente a la Formación Glen Rose, en Walnut Spring, Texas; Smith (1970) describe esta unidad como Formación Telephone Canyon. En el área estudiada, aflora en el cañón que forma el cauce del Río Bravo y en el Complejo La Cueva, donde se encuentra cubierta parcialmente por aluvión. Está constituida por dos unidades con un espesor total de 102 m. La unidad inferior consiste de 35 m de estratos medianos de calizas con ciprínidos y ostreidos; la unidad superior está conformada por 67 m de margas con abundante *Exogyra* sp, *Turritella* sp., y braquiópodos muy bien preservados.

Debido a que tiene un mejor grado de compactación y dureza y a que se encuentra encajonada entre las formaciones Glen Rose y Edwards, es fácilmente reconocible en el campo ya que topográficamente forma un cambio de pendiente entre dichas formaciones, como sucede en el Cañón del Cíbolo.

Formación Edwards

Compuesta por calizas de estratos medianos de textura mudstone a wackstone, con miliólidos, horizontes de lutitas y nódulos de pedernal, cuya edad corresponde al Albiano Medio.

Formación West Nueces

Conformada por calizas de textura media (wackstone) que hacia su base presenta estructura nodular. Se encuentra sobreyaciendo a las margas y calizas de la Formación Telephone Canyon y subyaciendo a las calizas de la Formación Mcknighth. Presenta amplios afloramientos en el flanco este de la Sierra del Burro y se considera la continuación hacia el este de la Formación Devils River Inferior, pero adelgazándose en forma de cuña, ya dentro del ambiente de una gran laguna.

Su espesor varía de 183 m en el oeste y 46 m hacia el este. Constituye lodolitas esferulíticas calcáreas de estratificación media a delgada, con capas que contienen gasterópodos y mantos delgados de pedernal. Presenta degradación lenta de afinidades arrecifales a medida que se aleja de los bordes de los bancos de la Formación Devils River, graduándose hacia el interior en facies lagunares que caracterizan a la Formación Mcknigth. Presenta en su base grandes biohermas y hacia su cima biostromas.

Formación Mcknigth

Está constituida por calizas oscuras dispuestas en capas delgadas, evaporitas y brechas de colapso, que sobreyace a las calizas de la Formación West Nueces y subyacen a las calizas de la Formación Salmon Peak. Aflora principalmente al sur y sureste del anticlinal de la Serranía El Burro, en donde presenta su máximo espesor que es de 151 m, localidad en la que está compuesta de calcarenitas y calizas fosilíferas con nódulos de pedernal intercalados y pseudomorfos de cristales de sal, que indican la formación de evaporitas.

Su porción media consiste de lodolita calcárea arcillosa de estratificación delgada a laminar, en tanto que la cima consta de capas de brecha separadas de capas delgadas calcarenitas y lodolitas calcáreas de textura esferulítica, que ocasionalmente contienen nódulos de pedernal. Su ambiente de depósito indica condiciones euxínicas de alta salinidad.

Formación Kiamichi

Consiste de lutitas calcáreas de color gris oscuro, que intemperizan a tonalidades verdosas, las cuales se observan interestratificadas con caliza de textura mudstone y wackestone nodulares, de color gris claro a gris oscuro, dispuestas en capas de estratificación delgada a media. En su porción media presenta un cuerpo calcáreo constituido por caliza de textura mudstone de fragmentos biógenos.

Se caracteriza por su abundante contenido de fauna fósil, principalmente de amonitas, equinodermos, pelecípodos y gasterópodos. También presenta microorganismos básicamente planctónicos y abundantes concreciones. Los sedimentos de esta formación se depositaron en un ambiente de mar abierto, de aguas relativamente profundas de baja energía.

Grupo Washita

Se encuentra constituido por las formaciones Georgetown, Salmon Peak, Del Río y Buda, que se describen a continuación.

Formación Georgetown

Consiste de caliza de textura de calcarenita, de color gris a gris claro, de estratificación media principalmente, aunque posee algunas capas tanto delgadas como gruesas.

Contiene algunos nódulos de pedernal, así como globigerínidos, equinodermos y clásticos biógenos. Se le considera de edad Albiano Tardío.

Formación Salmon Peak

Se han agrupado con este nombre a calizas arcillosas con nódulos de pedernal e inclusiones de marcasita que conforman estratos potentes. Aflora en forma de una delgada banda que rodea a la Sierra del Burro y forma la parte superior del Complejo Arrecifal del Burro. Sus límites superior e inferior son transicionales, pero fácilmente reconocibles en el campo, ya que contrastan con las unidades que la encajonan.

Litológicamente, su límite inferior es transicional sobre la Formación Kiamichi; en tanto que su límite superior es un cambio gradual de las calizas en estratos potentes de esta formación hacia la secuencia de sedimentos clásticos y calcáreos de la Formación del Río. Su espesor es variable, con un promedio de 245 m determinado en la Cuenca de Maverick, ubicada al oeste de la región. Los primeros 145 m a partir de su base, están conformados por lodolita calcárea a caliza wackstone con globigerina y nódulos de pedernal en la cima. Los restantes 100 m constan de calcarenitas con fragmentos de conchas. En dicha cuenca su porción superior se adelgaza hacia el este, hasta desaparecer.

Formación Del Río

Fue originalmente descrita por Hill y Vaughan en 1898. Su localidad tipo se encuentra en la Ciudad de Del Río, Texas y consiste de 60 m de lutitas fosilíferas de color amarillento. Aflora esporádicamente en la porción nor-oriental de la Serranía del Burro, en los flancos del Sinclinal del Abanico y en el Complejo La Cueva, en donde consiste de lutitas, areniscas, margas y yesos con abundantes nódulos de pirita y marcasita.

Sus límites superior e inferior son transicionales, pero fácilmente reconocibles ya que se encuentra encajonada entre formaciones más resistentes por lo que presenta formas de pendiente suave.

En la Serranía El Burro presenta un espesor muy delgado y aparece como una delgada banda en contacto con la Formación Buda que la sobreyace.

En su litología predominan las lutitas fosilíferas con nódulos de pirita, alcanzando un espesor máximo de 124 m en el centro de la porción oriental de la Cuenca de Maverick. Con la aparición de esta formación llegaron a su fin, a escala regional, las calizas de borde arrecifal y de plataforma en el norte de México y en el sur de Texas. Un levantamiento regional provocó la sedimentación de vastas cantidades de materiales terrígenos que dieron origen a esta formación.

Formación Buda

Fue descrita por Hill (1900) en Shoal Creek, Austin Texas, como una unidad consistente de estratos medianos de margas y calizas con Budaiceras y Exogyra ponderosa. Dentro de la Sierra del Burro, aflora en el Rancho El Abanico, Rancho Valencia, Complejo La Cueva y en Rancho Nuevo.

Está constituida por 30 m de estratos medianos de calizas con foraminíferos y margas con braquiópodos y nódulos de hematina y pirita. Su límite es reconocible topográficamente pues constituye un cambio litológico con la Formación del Río, la cual presenta formas de lomeríos.

CRETÁCICO SUPERIOR

Formación Eagle Ford

Está constituida por una alternancia de lutitas calcáreas de color gris a gris oscuro y calizas de estratificación delgada, ambas con una estructura laminar característica que con el intemperismo forman lajas, por lo cual también se le ha llamado “Laja Boquillas”. Se erosiona fácilmente debido a su suavidad.

Afloran en una delgada banda al pie de la Sierra del Burro y su espesor es variable de 100 a 180 m, según los resultados de pozos exploratorios perforados por CFE y PEMEX.

Formación Austin

Está formada por calizas de color gris claro, en estratos de espesor medio, con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en el Lomerío de Peyotes que corresponde a un anticlinal, continuación del buzamiento sureste del anticlinal de la Sierra del Burro. A diferencia de la Formación Eagle Ford, no presenta estructura laminar y al intemperizarse no forma lajas, sino que su desprendimiento se efectúa en fragmentos ovoides de distintos tamaños. Su espesor es de 300 m y se considera que se depositó en un ambiente nerítico con aporte de material terrígeno.

Formación Upson

Está constituida por lutitas y limolitas dispuestas en capas delgadas a laminares, que ocasionalmente presentan capas calcáreas de estratificación mediana. Aflora en los Ejidos La Maroma y Maravillas. Su espesor varía entre 300 y 450 m; sin embargo, en el pozo Coconal No. 1, PEMEX reportó 122 m. Su depósito se asocia a facies de prodelta de un sistema desarrollado durante el Cretácico Superior.

Formación San Miguel

Originalmente fue descrita por Dumble en 1892 en Texas y ha sido ampliamente estudiada por su relación con los yacimientos de carbón que son explotados en la región, en donde muestra un espesor promedio de 277 m.

Su litología está conformada por areniscas de grano fino a medio, de estratificación mediana; que presentan huellas de pelecípodos, así como intercalaciones de limolita. Aflora en las márgenes del Río Escondido y Ejido La Maroma. Su ambiente de depósito corresponde a un frente deltaico. Se encuentra subyaciendo concordantemente a la Formación Olmos y es muy fosilífera.

Formación Olmos

Compuesta de lutitas y limolitas de estratificación delgada, con algunas intercalaciones de areniscas; presenta estructuras de carga, rizaduras de corriente, restos de raíces, plantas fósiles y en la base mantos de carbón, que constituye el yacimiento de la Cuenca Fuentes-Río Escondido. No aflora en la zona pero se le conoce ampliamente debido a la exploración y evaluación de las reservas de carbón que explota MICARE, tanto en minas subterráneas como a cielo abierto. Su espesor varía entre 150 y 200 m; de acuerdo con sus características, su depósito corresponde a un ambiente de planicie de inundación y pantanos, asociados a una planicie deltaica.

Se encuentra expuesta en varios lugares de la zona en estudio, en las excavaciones de los tajos a cielo abierto.

Formación Escondido

Se trata de una secuencia de lutitas y areniscas calcáreas, con abundantes fósiles y horadaciones causadas por organismos, estratificación cruzada, huellas de oleaje, entre otras estructuras. Sus afloramientos se restringen a Villa de Fuentes, Arroyo Castaños y en ambas márgenes del Río Bravo. Su espesor varía entre 120 y 180 m, su ambiente de depósito corresponde al de una plataforma interdeltaica.

CENOZOICO

Cuenca Terciaria de Burgos

Las rocas que conforman esta cuenca afloran sobreyaciendo a las sucesiones anteriores; la secuencia inicia con la Formación Midway constituida por lutitas y areniscas que presentan huellas de oleaje y de edad Paleoceno.

Descansando concordantemente se presenta la Formación Wilcox del Eoceno Inferior, constituida por areniscas con huellas de oleaje y gusanos, así como lutitas laminares. En concordancia le sobreyace la Formación Carrizo, que básicamente consiste de areniscas con algunos horizontes de alto contenido de cuarzo, cuya edad corresponde al Eoceno Medio.

Sobreyaciendo concordantemente, aflora la Formación Big Ford, constituida por areniscas, lutitas carbonosas, algunos mantos de carbón y limolitas, de edad Eoceno Superior. En esta misma época se depositó un conglomerado polimíctico constituido de gravas y boleos, fragmentos de composición calcárea y rocas ígneas de composición diorítica, de edad Plioceno Pleistoceno, conocido como Gravas Ubalde.

Conglomerado Sabinas-Reynosa

Está constituido principalmente por un conglomerado semiconsolidado, de clastos calcáreos semi-redondeados, mal clasificados, de tamaño variable desde gravas hasta guijarros, empacados en un cementante calcáreo, que presenta una capa de caliche hacia la cima.

Aflora ampliamente en toda la planicie, descansando discordantemente sobre los sedimentos calcáreos del Cretácico Superior. Su espesor generalmente no sobrepasa 7 u 8 m y en conjunto con el caliche puede alcanzar 40 m. La empresa MICARE (1999) reporta con base en información de barrenos exploratorios, tres subunidades, denominadas de abajo hacia arriba, conglomerado, caliche arenoso y caliche arcilloso, esta última con distribución muy irregular. Su origen se interpreta como el producto de la erosión sobre las porciones de terreno topográficamente elevadas, como la Serranía El Burro y Lomerío Peyotes.

CUATERNARIO

Aluvión

Está conformado por depósitos de grava poco compactos, con predominio de clastos mal clasificados y semirredondeados de rocas ígneas extrusivas, con fragmentos de pedernal lechoso y esporádicos clastos calcáreos, que coronan discordantemente algunos lomeríos a lo largo de la margen derecha del Río Bravo.

Aflora en la planicie y su espesor varía de 2 a 6 m. Otro tipo de depósitos aluviales son clastos principalmente calcáreos en matriz arenosa, ligeramente cementados por calcita, que rellenan las partes bajas del terreno. Su granulometría, espesor y distribución varían mucho, de acuerdo a su área de exposición.

4.2 Geología Estructural

Tectónicamente la región se ubica dentro de la evolución del Terreno Coahuila, probablemente cercana a la orogenia Ouachita-Marathon-Apalachiana, originada por una colisión entre África-América del Sur y América del Norte, durante el Pensilvánico-Pérmico. Las estructuras que afloran en el área presentan orientación NW-SE y N-S, en la porción suroeste afloran anticlinales con recumbencia al NE; algunas cabalgaduras con vergencia al noreste y klipfes localizados en el Golfo de Sabinas, observándose que la litología de este paleo-elemento se encuentra cabalgando sobre las rocas del paleo-elemento Burro-Peyotes con un transporte tectónico hacia el NE.

La serranía Burro-Peyotes se caracteriza por presentar anticlinales y sinclinales debidos a los esfuerzos compresivos de la Orogenia Laramide, la cual originó estas estructuras desde finales del Cretácico al Eoceno, el límite entre estos paleo-elementos se interpreta como el límite Boquillas-Sabinas, el cual se ha definido como una falla lateral izquierda.

En la porción noreste existe un sinclinal simétrico que delimita la cuenca carbonífera Fuentes-Río Escondido, seguido por un homoclinal compuesto por rocas clásticas del Terciario, que se manifiesta como un anticlinal muy suave (Carta Geológica-Minera Piedras Negras H14-10. Escala 1:250,000. SGM, 2008). La estructura predominante es un anticlinorio, orientado NW-SE en la Serranía El Burro y Lomerío Peyotes, formada como consecuencia de la Orogenia Laramide ocurrida durante el Cretácico Superior al Terciario Inferior. Los anticlinales Agua Verde y Chupaderos, ubicados al noroeste del acuífero, son ondulaciones estructurales asociadas a dicho anticlinorio.

La Sierra del Burro tiene forma cómica con flancos suaves, cuyos echados son del orden de 3 a 5°. El eje del anticlinal parte del centro-oeste de la sierra, en dirección al sureste, para buzar al poniente de Allende. Al sureste de esta sierra se encuentra otro anticlinal conocido como Lomerío de Peyotes, en el que afloran calizas de la Formación Austin del Cretácico Superior. Tiene flancos de suave pendiente y la dirección de su eje es NW-SE. Otros anticlinales de menor magnitud se encuentran en los alrededores. En el flanco occidental del Anticlinal El Burro, existe una falla importante que presenta un desplazamiento vertical o salto de alrededor de 1250 m con el bloque caído hacia el este. Se trata de una falla normal originada como consecuencia del relajamiento posterior a la Orogenia Laramide. Esta falla se conoce con el nombre de El Cedral y tiene importancia geohidrológica, ya que aparentemente constituye una barrera al flujo subterráneo y forma el límite sur del acuífero.

Con base en imágenes Landsat, MICARE (1999) señala que el Río Bravo está controlado por un sistema de fallas y fracturas orientadas norte-sur y este-oeste e indica que en el subsuelo existe un sistema de fallas escalonadas de bajo desplazamiento, de hasta 30 m, orientadas principalmente en dirección NW-SE.

4.3 Geología del Subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recaba en el acuífero, por correlación con acuíferos vecinos, así como con la información obtenida a partir de cortes litológicos de algunos pozos y las evidencias de la geología superficial, es posible definir la existencia de dos medios hidrogeológicos, uno de naturaleza porosa y otro fracturado, que conforman un acuífero de tipo libre heterogéneo y anisótropo de baja capacidad de almacenamiento.

El medio poroso constituye la unidad superior y está conformado por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada que constituyen el lecho y la llanura de inundación de los ríos San Rodrigo, San Antonio, Santo Domingo, Escondido y Castaños y otros arroyos tributarios, así como por los conglomerados polimícticos de la Formación Sabinas.

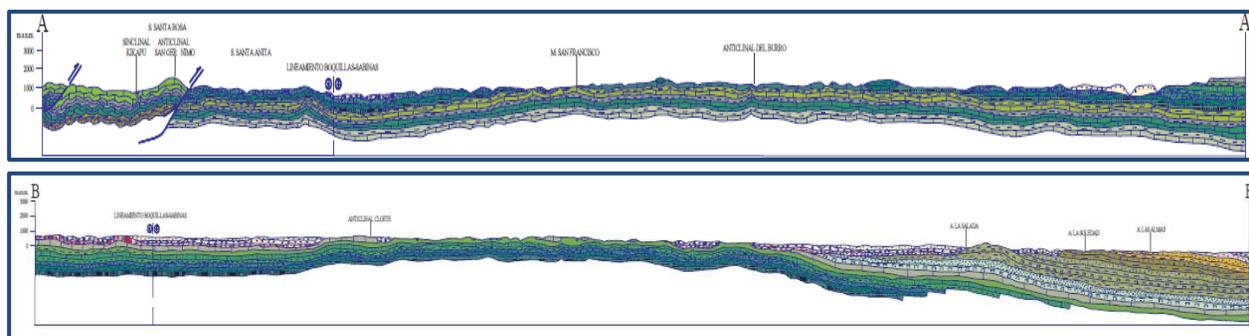
Los depósitos granulares y conglomeráticos tienen varios son de escaso espesor y fueron, en gran parte, el relleno de depresiones o cuencas formadas en fosas tectónicas que se produjeron durante la Orogenia Laramídica.

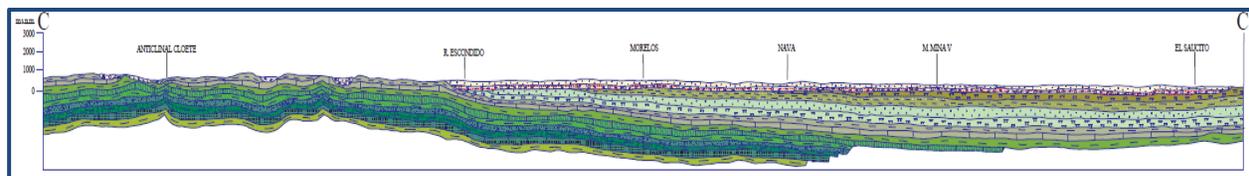
La porción inferior se encuentra en una secuencia de rocas sedimentarias de edad Cretácico Superior compuesta por lutitas, limolitas, areniscas y calizas arcillosas de las formaciones Escondido, Olmos San Miguel, Upson, Austin, Eagle Ford y Grupo Washita, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las rocas calcáreas.

Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que presentan condiciones de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas.

Las fronteras al flujo subterráneo y el basamento geohidrológico del acuífero están representadas por las mismas rocas sedimentarias marinas al desaparecer el fracturamiento y por las secuencias de depósitos terrígenos finos que conforman las lutitas y limolitas.

A mayor profundidad se considera que el basamento geohidrológico regional está constituido por la secuencia de lutitas, limolitas y areniscas del Cretácico Inferior (figura 3).





Fuente: Carta Geológica-Minera H14-10 "Piedras Negras. Escala. 1:250,000 (SGM, 2008)

Figura 3. Secciones geológicas esquemáticas

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir que el acuífero es de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, constituido, en su porción superior, por los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, así como conglomerados polimícticos, cuyo espesor puede alcanzar algunas decenas de metros hacia el centro de los valles. La porción inferior se aloja en una secuencia de rocas sedimentarias marinas calcáreo-arcillosas, que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento y disolución en el caso de las calizas. Las calizas y areniscas constituyen horizontes acuíferos que presentan condiciones de confinamiento, debido a que su litología incluye alternancia con lutitas y limolitas, como lo demuestran algunos pozos perforados en las estribaciones de la Sierra del Burro.

5.2 Parámetros hidráulicos

Los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, han sido obtenidos a través de pruebas de bombeo de larga y corta duración realizadas en estudios previos.

De los resultados de su interpretación por métodos analíticos convencionales, se establece que los valores de los parámetros hidráulicos son muy variables y dependen de las unidades litológicas. En los pozos ubicados en las rocas calizas, la transmisividad es alta, de 20 a $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Hacia la planicie de Allende-Piedras Negras, el Conglomerado Sabinas-Reynosa presenta cavidades de gran tamaño que provocan alta transmisividad, donde se obtuvieron valores de mayores $40 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, aunque en la mayoría de los aprovechamientos la transmisividad es menor, del orden de 0.1 a $5.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Los valores de coeficiente de almacenamiento reportados en trabajos previos varían de 0.1 a 0.01 en la zona de Morelos; y del orden de 0.001 en la mayor parte de la planicie del acuífero.

5.3 Piezometría

Con respecto a la información piezométrica de los niveles de agua subterránea, se cuenta con la información recabada del periodo 2008-2011.

5.4 Comportamiento hidráulico

5.4.1 Profundidad al nivel estático

La configuración de profundidad al nivel estático en 2011 presenta valores que varían entre 5 y 25 m, que se incrementan de la planicie y de las zonas cercanas al cauce de los ríos y arroyos hacia las regiones topográficamente más altas. Valores de 5 a 7 m se registran al noreste de los tajos, debido a la recarga artificial por el retorno del agua de “achique” de las minas, y en las inmediaciones del Río Bravo. Al sureste de Nava se presentan valores puntuales someros debido tanto a la baja topografía del terreno, como a la infiltración de los retornos de riego en la zona agrícola; en tanto que al poniente de Morelos los niveles se profundizan conforme de asciende topográficamente (figura 4).

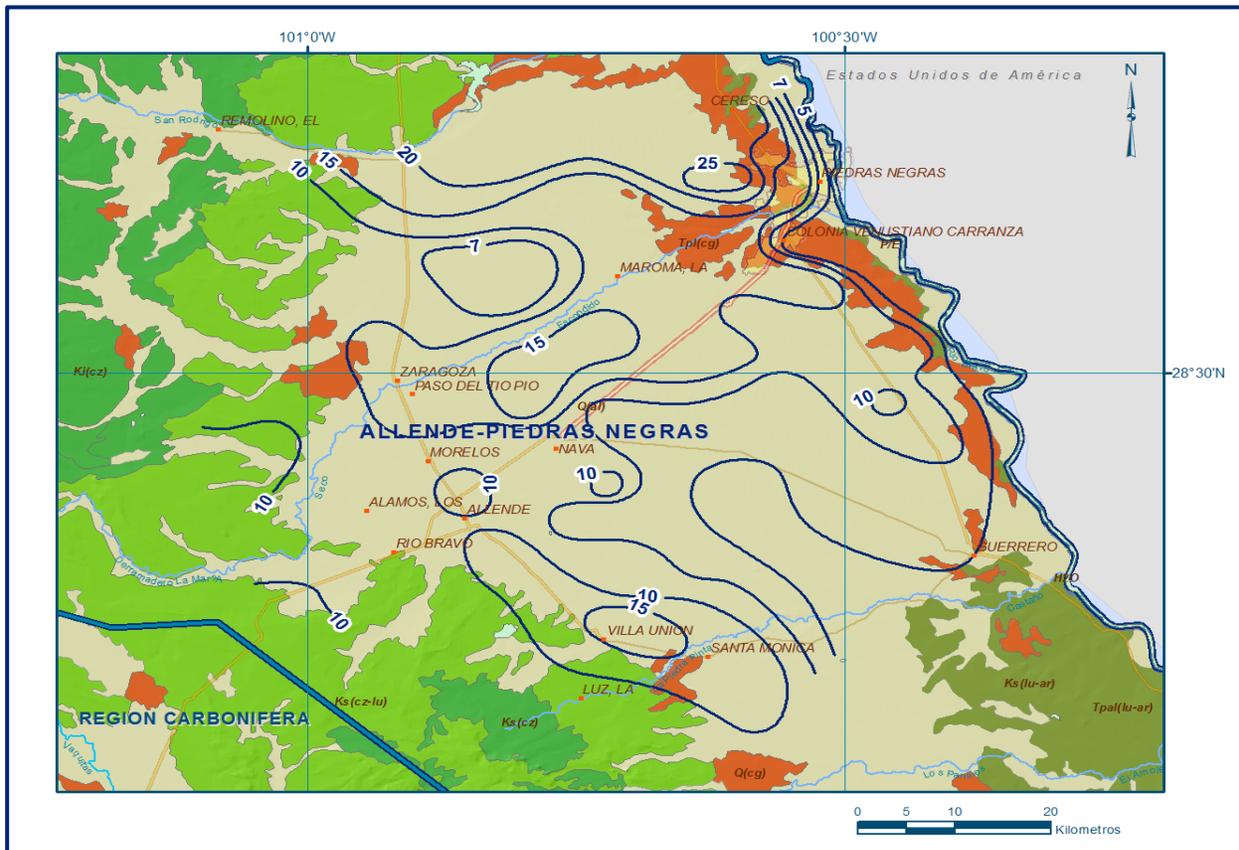


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2011)

5.4.2 Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático para el año 2011 registran valores de carga hidráulica de 220 a 410 msnm, que se incrementan de la zona cercana al cauce del Río Bravo hacia el occidente, mostrando el reflejo de la topografía, al igual que los valores de profundidad, lo que indica que el flujo subterráneo no ha sufrido alteraciones o distorsiones causadas por la concentración de pozos o del bombeo. Las líneas equipotenciales con valores de elevación más altos, mayores de 370 a msnm, se localizan en toda la porción occidental, en la franja comprendida entre Zaragoza y Villa Unión, en tanto que las menores elevaciones, de 220 a 240 msnm, se registran en la porción oriental, de manera paralela al cauce del Río Bravo, hacia donde tiende a descargar el flujo subterráneo. De esta manera, se observa que la red del flujo subterráneo presenta una dirección preferencial suroeste-noreste, paralela a la dirección de escurrimiento de los ríos (figura 5).

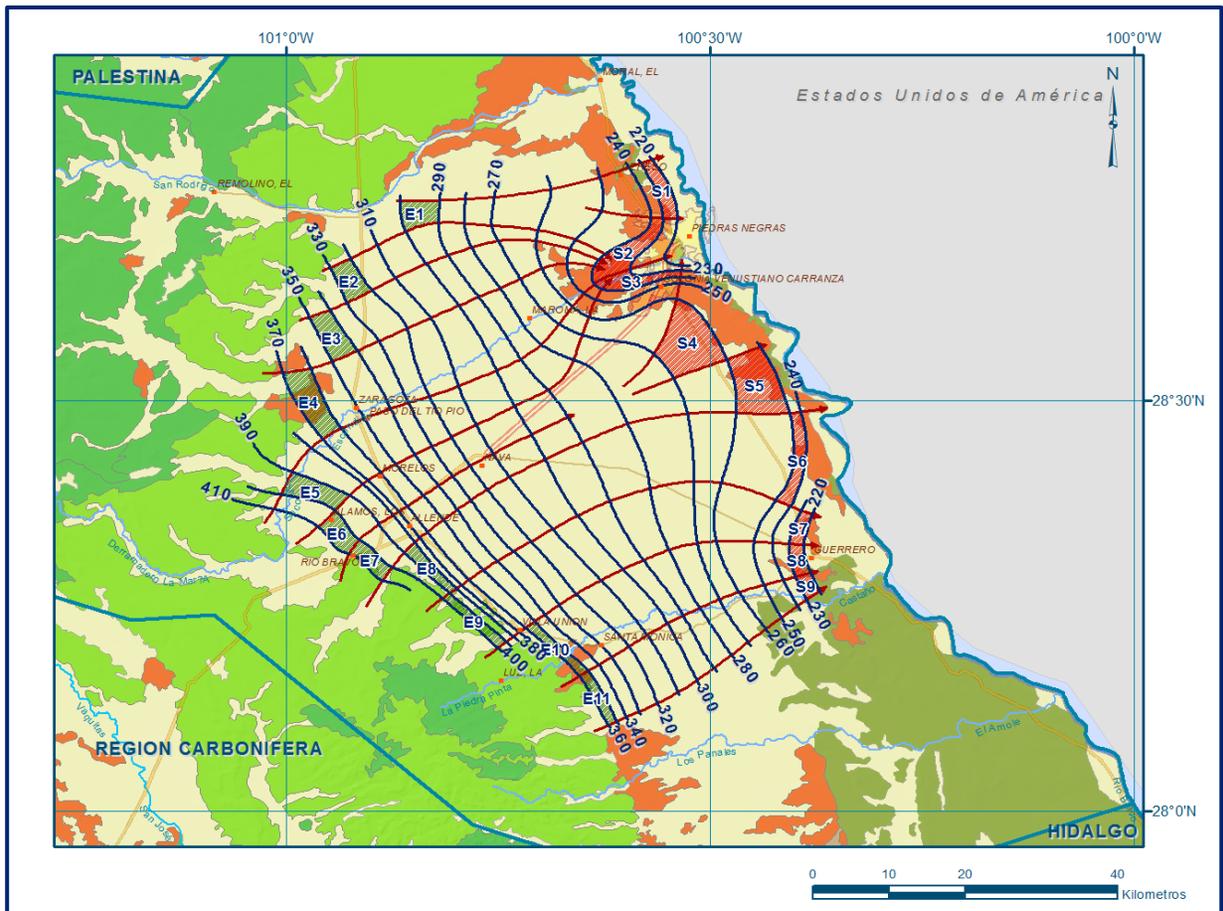


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2011)

5.4.3 Evolución del nivel estático

La configuración de evolución del nivel estático para el periodo 2008-2011 muestra valores tanto de abatimiento como de recuperación. Los abatimientos son de 1 a 2 m, que presentan un promedio anual de 0.5 m, y se registran en la porción oriental del acuífero, en la zona comprendida entre los poblados La Maroma y Guerrero. Las recuperaciones varían también de 1 a 2 m, aunque en zonas de menor superficie que los abatimientos, y únicamente se registraron al norte de Zaragoza y entre Allende y Nava. En general, en la mayor parte de la superficie del acuífero no se registran cambios significativos en la posición de los niveles del agua subterránea (figura 6).

Como se puede observar, predominan los valores de abatimiento, que son el reflejo de un periodo de estiaje en la región registrado en los últimos años. En la zona de los tajos mineros para la explotación del carbón se generaron recuperaciones locales al dejar de operar algunas de estas obras mineras y también como consecuencia de la recarga artificial.

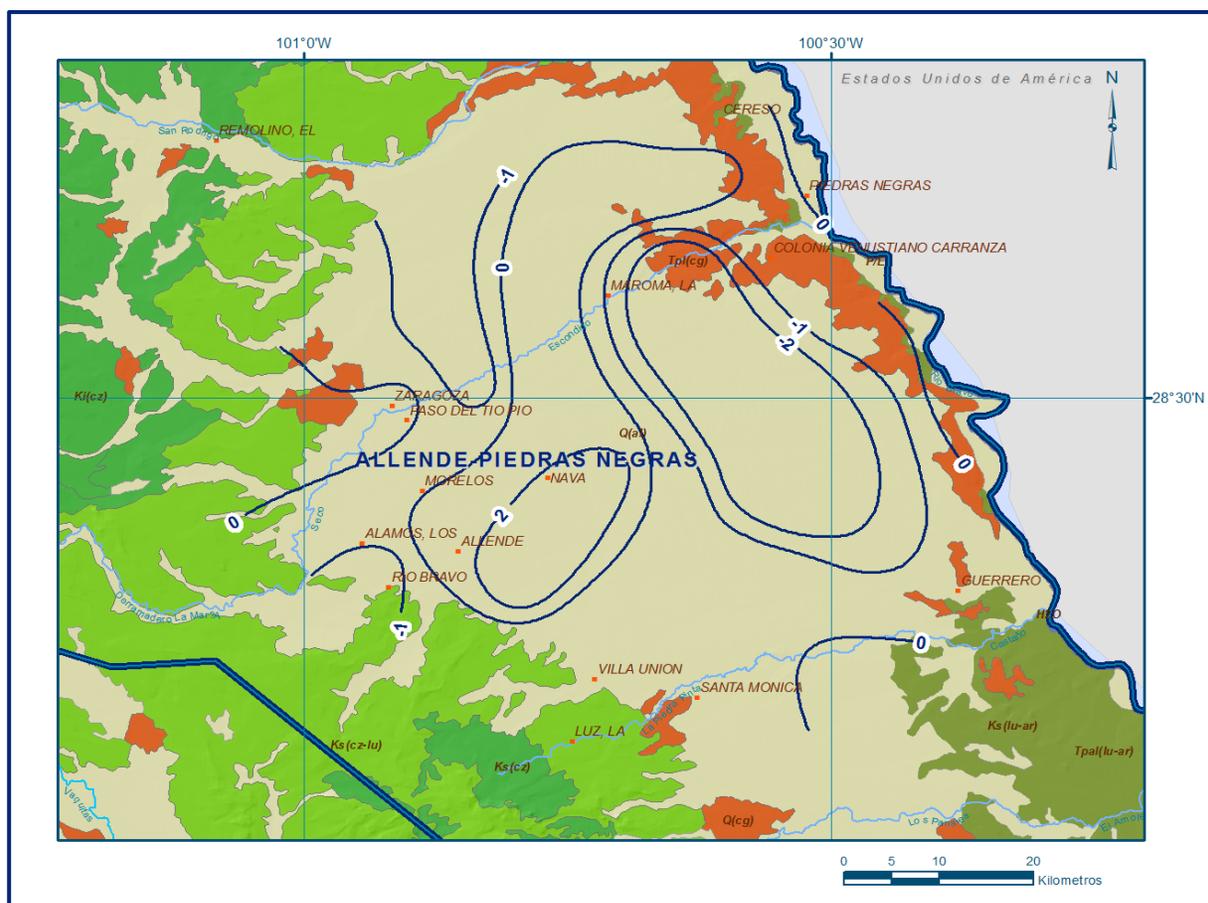


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (2008-2011)

5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo realizados en estudios previos (Lesser 2003, 2008 y COPEI, 2006), se tomaron muestras de agua en 55 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente. Además de las mediciones hechas in situ, las determinaciones de laboratorio incluyeron iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, Eh, dureza total y sólidos totales disueltos (STD).

Adicionalmente, en el 2011 se obtuvieron 16 muestras en la porción oriental del acuífero en las que además de las determinaciones anteriores se incluyeron hierro, manganeso, arsénico y mercurio

De acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos, la concentración de STD varía de 304 a 2589 mg/l. Se identifican tres zonas de diferente concentración de STD: la primera contiene agua con STD menores de 1000 mg/l en la porción occidental, en las estribaciones de la Sierra del Burro, al poniente de Zaragoza y Allende. Valores de concentración de 1000 a 2000 mg/l se localizan en la mayor parte de la planicie, y la tercera zona se ubica al oriente en una franja alargada entre Morelos y Zaragoza, en la que el agua contiene concentraciones de STD mayores de 2000 mg/l.

De manera general, la porción centro-oriental del acuífero, se caracteriza por presentar agua con más de 1,000 mg/l de STD, que es el límite máximo permisible (LMP) establecido por 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. La temperatura varió de 19.3 a 36.1 °C y el pH de 7.1 a 7.6. Concentraciones altas de sulfatos, mayores a 400 que establece como LMP la norma mencionada, se registran de manera puntual en las inmediaciones de Zaragoza y Morelos, asociadas a la disolución de yesos y anhidritas de la Formación Mcknigth, a través de fracturas y conductos de disolución.

Por otra parte, de acuerdo con el criterio de Wilcox, que relaciona la conductividad eléctrica con la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el agua extraída presenta salinidad media (C2), alta (C3) o muy alta (C4) y contenido bajo de sodio (S1) a muy alto (S4). Predominan las aguas que se clasifican como C2-S1, 32 como C3-S1 y 2 como C4-S1, es decir, predomina el agua de salinidad media a alta, con bajo contenido de sodio intercambiable.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, en la porción oriental predomina la familia cálcico–bicarbonatada, que representa agua de reciente infiltración con periodos cortos de residencia, que ha circulado a través de rocas sedimentarias calcáreas. En la porción centro-oriental, de manera local, se presenta la familia del agua cálcico–sulfatada, asociada, como ya se mencionó, a la presencia de yesos. Al sur de Piedras Negras el agua se clasifica como cálcica-mixta que corresponde a una mezcla.

Con respecto a la concentración de elementos traza, dos muestras presentaron concentraciones de fierro de 3.314 y 0.5641 mg/l, que superan el LMP de 0.3 mg/l y una muestra registró una concentración de 0.002 mg/l de mercurio que supera el LMP establecido en la norma mexicana.

6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA

Se integró el censo de aprovechamientos de agua subterránea con los datos reportados por los estudios previos mencionados y se complementó esta actividad con visitas de campo realizadas en el 2008. De acuerdo con esto, se identificó la existencia de 778 aprovechamientos, de los cuales 675 corresponden a pozos, 64 a manantiales y 39 a norias. El volumen de extracción conjunta asciende a **128.6 hm³ anuales**, de los cuales 89.0 hm³ (69.2 %) se destinan al uso agrícola, 22.2 hm³ (17.3 %) al uso industrial, 6.3 hm³ (4.9 %) para abastecimiento público-urbano y los 11.1 hm³ restantes (8.6%) para usos doméstico, abrevadero y otros. Este volumen incluye la descarga de los pozos brotantes.

Adicionalmente, a través de la gran cantidad de **manantiales**, localizados en las calizas al pie de la Sierra El Burro, entre Zaragoza, Nava, Allende y Villa Unión, se descarga un caudal de 8.7 m³/s, que representan un volumen anual de **274.4 hm³**, de los cuales 255.0 hm³ (92.9 %) se destinan al uso agrícola, 12.1 hm³ más (4.4%) para abastecimiento público-urbano y los 7.3 hm³ restantes (2.7%) para abrevadero y otros. En la zona próxima al Río Bravo, entre Piedras Negras y Guerrero, existen manantiales de menores gastos, que en total descargan un volumen de **7.0 hm³ anuales**, que se utilizan para usos agrícola, abrevadero y otros.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance se realizó para el periodo 2008-2011 en una superficie de 2,950 km² del valle, en la que están dispersos la gran mayoría de los aprovechamientos y en la que se cuenta con información hidrogeológica. 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:

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

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 definido para el acuífero, las entradas están integradas por la recarga natural que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita tanto en el valle como en la sierra del burro, y a lo largo de los escurrimientos (Rv) y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

Como recarga inducida se considera, la infiltración de los excedentes del agua destinada al uso agrícola (Rr), que representa la ineficiencia en la aplicación del riego en la parcela. Debido a que el volumen de agua destinado al uso público-urbano es menor, solo se considera la infiltración por retornos del riego (Rr). Adicionalmente se produce infiltración del agua conducida a través de los canales de riego (Ic). De manera artificial (Ra) se infiltra el agua procedente de los tajos de explotación de carbón que realiza la empresa Minera Carbonífera Río Escondido (MICARE) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

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:

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

Donde:

- Rv:** Recarga Vertical
- Rr:** Recarga por retornos de riego
- Ic:** Infiltración en canales
- Ra:** Recarga artificial
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Bombeo
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm:** Descarga a través de manantiales
- Dfb:** Descarga por flujo base
- ETR:** Evapotranspiración real
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

De esta manera, despejando la recarga vertical:

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

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 área se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. 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 2011 (figura 5), mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

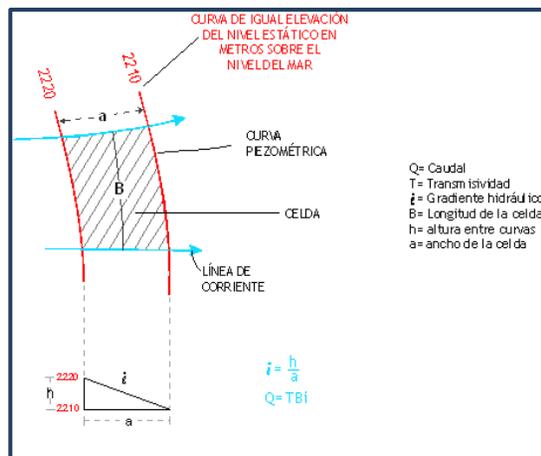
Donde:

Q = gasto que pasa por un determinado canal de flujo;

T = transmisividad;

B = ancho de la celda;

i = gradiente hidráulico



En esta configuración se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la Ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se puede observar que para las celdas identificadas se presenta un flujo total de entrada de **65.8 hm³/año**.

Tabla 2. Cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	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	3500	4385	10	0.00228	0.0010	0.0080	0.2
E2	5075	2905	10	0.00344	0.0020	0.0349	1.1
E3	6425	2895	10	0.00345	0.0030	0.0666	2.1
E4	9165	2940	10	0.00340	0.0040	0.1247	3.9
E5	6970	2635	10	0.00380	0.0180	0.4761	15.0
E6	4830	2660	10	0.00376	0.0080	0.1453	4.6
E7	5290	1913	10	0.00523	0.0080	0.2212	7.0
E8	7675	1328	10	0.00753	0.0040	0.2312	7.3
E9	9325	1200	10	0.00833	0.0040	0.3108	9.8
E10	9040	1025	10	0.00976	0.0040	0.3528	11.1
E11	7585	1300	10	0.00769	0.0020	0.1167	3.7
Total entradas							65.8

7.1.3 Recarga por retornos de riego (Rr)

Esta componente de recarga debida a la infiltración de los excedentes del riego agrícola, se estimó considerando una superficie de 300 km², obtenida a través de imágenes de satélite, la cual se multiplicó por una lámina promedio de riego de 1.0 m y por un coeficiente de infiltración de 0.16, tomando en cuenta la presencia de caliche y en menor grado arcillas en la capa superficial del suelo. Con esto, se obtuvo un volumen de infiltración por retornos de riego de **48.0 hm³/año**.

7.1.4 Recarga artificial (Ra)

La recarga artificial era producida principalmente por MICARE, a través de estanques, donde se infiltraba el agua extraída por el achique en los tajos de explotación de carbón. Su valor ha disminuido a lo largo del tiempo y actualmente ha desaparecido. Ahora sólo la Comisión Federal de Electricidad la genera en sus instalaciones de la Central Termoeléctrica de Ciclo Combinado; según estimaciones hechas, el valor de la recarga efectiva es de **3.0 hm³ anuales**.

7.1.5 Infiltración en canales (Ic)

La infiltración en canales de riego, se calculó multiplicando el volumen que se conduce a través de dichos canales (210 hm³/año), por un factor 0.16, con lo que se obtuvo un volumen de **33.6 hm³/año**.

7.2 Salidas

Las salidas se presentan de manera natural por evapotranspiración (ETR) en las zonas de niveles freáticos someros, mediante salidas subterráneas (Sh) hacia el Río Bravo, por flujo base (Dfb) de los ríos San Rodrigo, San Antonio y Escondido y a través de la descarga de una gran cantidad de manantiales (Dm). De manera artificial, por medio de la extracción por bombeo (B).

7.2.1 Evapotranspiración (ETR)

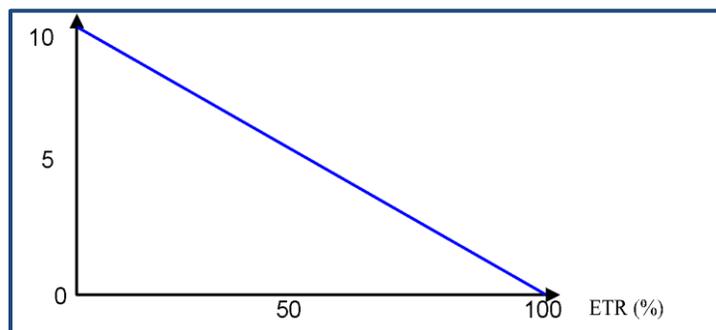
Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto, es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que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

Existe una zona del área de balance donde los niveles estáticos se encuentran a profundidades menores a 10 m de profundidad, que se considera el límite de extinción para que se produzca el fenómeno de evapotranspiración, hasta donde penetran las raíces de las plantas. Para la estimación de la evapotranspiración real se utilizó la ecuación empírica de Coutagne, considerando los valores promedio anual de precipitación de 500 mm y temperatura de 21° C., con los que se obtuvo una lámina de ETR de 433.2 mm anuales.

COUTAGNE	$ETR = P - \chi P^2$		
Donde:	P (m) =	0.500	
ETR= Evapotranspiración m/año	t (°C) =	21.0	
P = precipitación en m/año	ETR (m/año) =	0.4332	
$\chi = 1/(0.8 + 0.14t)$			
t = temperatura en °C			

La fórmula sólo es aplicable para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre $1/8\lambda$ y $1/2\lambda$, en la que ETR y P se expresan en metros, y T en °C. Si P es menor que $1/8\lambda$ la ETR es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación es mayor que $1/2\lambda$ la ETR es prácticamente independiente de P y su valor está dado por $ETR = 0.20 + 0.035 T$.

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 m, hasta la que penetra la vegetación en este tipo de climas, bajo el siguiente proceso: en zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menor a 10 m, se calcula el valor de ETR exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad al nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad límite de extinción de 10 m para el fenómeno de ETR, a menor profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 m el valor de ETR es nulo y a 0 m el valor es del 100 %, a 5 m el 50%, a 2 m el 80% etc.



Si consideramos una superficie de 246 km² en la que se registran niveles freáticos someros, menores a 10 m, con un promedio de profundidad al nivel estático de 7 m, de acuerdo con la gráfica anterior le corresponde el 30% de la lámina de ETR calculada que fue de 433.2 mm anuales, se obtiene un valor de evapotranspiración de 32.0 hm³ anuales. Por otra parte, existe agua subterránea que se encuentra expuesta a evaporación en los tajos mineros de donde se obtuvo un volumen evaporado de 11.8 hm³/año, que sumado a los 32.0 hm³ resulta un volumen total de evapotranspiración de 43.8 hm³/año.

Evapotranspiración = 246 km² (0.4332 m) (0.3) = 32.0 hm³ anuales

Evaporación en tajos mineros Evp = 11.8 hm³ anuales

Por lo tanto, ETR = **43.8 hm³ anuales**

7.2.2 Descarga por manantiales (Dm)

El valor de la descarga de los manantiales que existe dentro de la zona de balance (Dm), se obtuvo directamente mediante su aforo. Para tener un valor total de todos los que se ubicaron dentro del acuífero, se consideró la información de los aforos realizados en trabajos previos que consideraron diferentes áreas de estudio, incluidos los realizados en el 2011 y 2012. Como resultado se obtuvo un caudal de 8,700 lps, que representan un volumen promedio anual de **274.4 hm³**.

Como se comentó anteriormente, en la zona comprendida entre Piedras Negras y Guerrero, existen manantiales de menores gastos, que en total descargan un volumen de 7.0 hm³ anuales. Siendo el total de la descarga por manantiales de **281.4 hm³ anuales**.

7.2.3 Bombeo (B)

Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría el valor de la extracción por bombeo, dentro de la zona de balance asciende a **128.6 hm³/año**, que incluye un volumen promedio anual de 26.9 hm³ aportados por los pozos artesianos brotantes.

7.2.4 Descarga por flujo base (Dfb)

El volumen de la descarga por flujo base se estimó de los datos de aforos de la estación "Río Escondido" que mide el caudal de escurrimiento de los ríos San Antonio y Escondido.

Tomando como base el periodo de registro de 83 años comprendido entre 1932 y 2014, se estimó un caudal base de 1.141 m³/s, es decir un volumen de **36.0 hm³ anuales**.

7.2.5 Salidas subterráneas por flujo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático presentado en la figura 5.

El Valor estimado es de **19.3 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de salidas por flujo subterráneo horizontal

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h ₂ -h ₁ (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	8550	1770	10	0.00565	0.0002	0.0097	0.3
S2	9455	2895	10	0.00345	0.0010	0.0327	1.0
S3	8650	1935	10	0.00517	0.0020	0.0894	2.8
S4	6860	7275	10	0.00137	0.0050	0.0471	1.5
S5	8625	4980	10	0.00201	0.0050	0.0866	2.7
S6	12615	1500	10	0.00667	0.0020	0.1682	5.3
S7	4435	1680	10	0.00595	0.0020	0.0528	1.7
S8	4230	1810	10	0.00552	0.0040	0.0935	2.9
S9	2985	1895	10	0.00528	0.0020	0.0315	1.0
Total salidas							19.3

7.3 Cambio de almacenamiento (ΔV(S))

Para obtener el cambio de almacenamiento en la zona de balance, se utilizó la configuración de la evolución del nivel estático del periodo 2008-2011 (figura 6) y un coeficiente de almacenamiento entre 0.01 y 0.03, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

- ΔVS:** Cambio de almacenamiento en el período analizado
- S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance
- A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático
- h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período

El resultado obtenido refleja abatimiento o evolución negativa, por lo que se obtuvo un cambio de almacenamiento negativo que ascendió a **ΔV(S) = -12.5 hm³ anuales**, tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Área (km ²)	Sy	$\Delta V(S)$ (hm ³ /año)
-2	419.3	0.03	-25.2
-1.5	261.4	0.03	-11.8
-1.5	186.6	0.02	-5.6
-0.5	947.5	0.02	-9.5
-0.5	316.7	0.03	-4.8
0.5	537.9	0.02	5.4
1.5	82.2	0.01	1.2
2.0	211.2	0.03	12.7
	2962.8	TOTAL	-37.5
	Promedio anual		-12.5

Solución de la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de las componentes de la ecuación de balance, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la recarga vertical (Rv). De la ecuación (2), se tiene que:

$$Rv = B + Sh + Dm + Dfb + ETR \pm \Delta V(S) - Eh - Rr - Ra - Ic$$

Sustituyendo valores:

$$Rv = 128.6 + 19.3 + 281.4 + 36.0 + 43.8 - 12.5 - 65.8 - 48.0 - 3.0 - 33.6$$

$$Rv = 346.1 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Por lo tanto, el valor de la recarga total que recibe el acuífero (R), es la suma de la recarga que se produce dentro de la zona de balance, más la que tiene lugar fuera de ella. De esta manera es la suma de todas las entradas:

$$R = Rv + Eh + Rr + Ra + Ic$$

$$R = 346.1 + 65.8 + 48.0 + 3.0 + 33.6$$

$$R = 496.5 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

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:

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

Donde:

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

R = Recarga total media anual

DNC = Descarga natural comprometida

VEAS = Volumen de extracción de aguas subterráneas

8.1. Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de **496.5 hm³ anuales**, de los cuales son recarga natural y la recarga inducida y artificial.

8.2. Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero

Para el caso del acuífero, la descarga natural comprometida es de **274.4 hm³/año**, que corresponde a la descarga de los manantiales que existen en las calizas del piedemonte de la Sierra El Burro, que está comprometida principalmente para uso agrícola.

No se considera comprometido el volumen de las salidas subterráneas porque se presenta en forma de lloraderos en las terrazas del Río Bravo; además, al igual que el flujo base, su volumen es muy pequeño comparado con el que conduce el río y ambos pueden ser utilizados para la regularización de usuarios.

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 **241,544,394 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 aguas subterráneas (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.

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= R - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 496.5 - 274.4 - 241.544394 \\ \text{DMA} &= -19.444394 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario el déficit es de **19,444,394 m³ anuales**.

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua, 2006. Estudio para determinar la recarga, almacenamiento y descarga de agua subterránea en los acuíferos de la Serranía del Burro, Cerro Colorado-La Partida, Presa la Amistad, Palestina y Allende-Piedras Negras, en diversos municipios del Estado de Coahuila. Elaborado por Consultoría BETSCO, S. A.