



SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA

GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE
AGUA EN EL ACUÍFERO RÍO VERDE (2415), ESTADO DE SAN
LUIS POTOSÍ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

Contenido

1. GENERALIDADES.....	2
Antecedentes.....	2
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	4
2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD	5
3. FISIOGRAFÍA.....	7
3.1. Provincia fisiográfica.....	7
3.2. Clima.....	8
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	10
4. GEOLOGÍA.....	11
4.1. Estratigrafía.....	13
4.2. Geología estructural.....	17
4.3. Geología del subsuelo.....	18
5. HIDROGEOLOGÍA.....	18
5.1. Tipo de acuífero.....	18
5.2. Parámetros hidráulicos.....	19
5.3. Piezometría.....	19
5.4. Comportamiento hidráulico.....	20
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	22
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	23
6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA	25
7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	25
7.1. Entradas.....	26
7.1.1. Recarga vertical (Rv).....	26
7.1.2. Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	27
7.1.3. Recarga inducida (Rr).....	28
7.2. Salidas.....	29
7.2.1. Extracción por bombeo (B).....	29
7.2.2. Evapotranspiración (ETR).....	29
7.2.3. Descarga a través de Manantiales (Dm).....	30
7.2.4. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh).....	30
7.2.5. Flujo base (Fb).....	31
7.3. Cambio de almacenamiento (ΔVS).....	31
8. DISPONIBILIDAD	32
8.1 Recarga total media anual (R).....	32
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	33
8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).....	33
8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA).....	33
9. BIBLIOGRAFÍA	35

1. GENERALIDADES

Antecedentes

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

1.1. Localización

El acuífero Río Verde, definido con la clave 2415 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción centro-sur del Estado de San Luis Potosí, entre las coordenadas geográficas 21° 40' y 22° 28' de latitud norte y 99° 44' y 100° 14' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 2,756 km²(figura 1). Limita al norte con el acuífero Buenavista, al este con el acuífero Huasteca Potosina, al sur con Santa María del Río y al oeste con los acuíferos San Nicolás Tolentino y Cerritos-Villa Juárez, todos ellos pertenecientes al Estado de San Luis Potosí

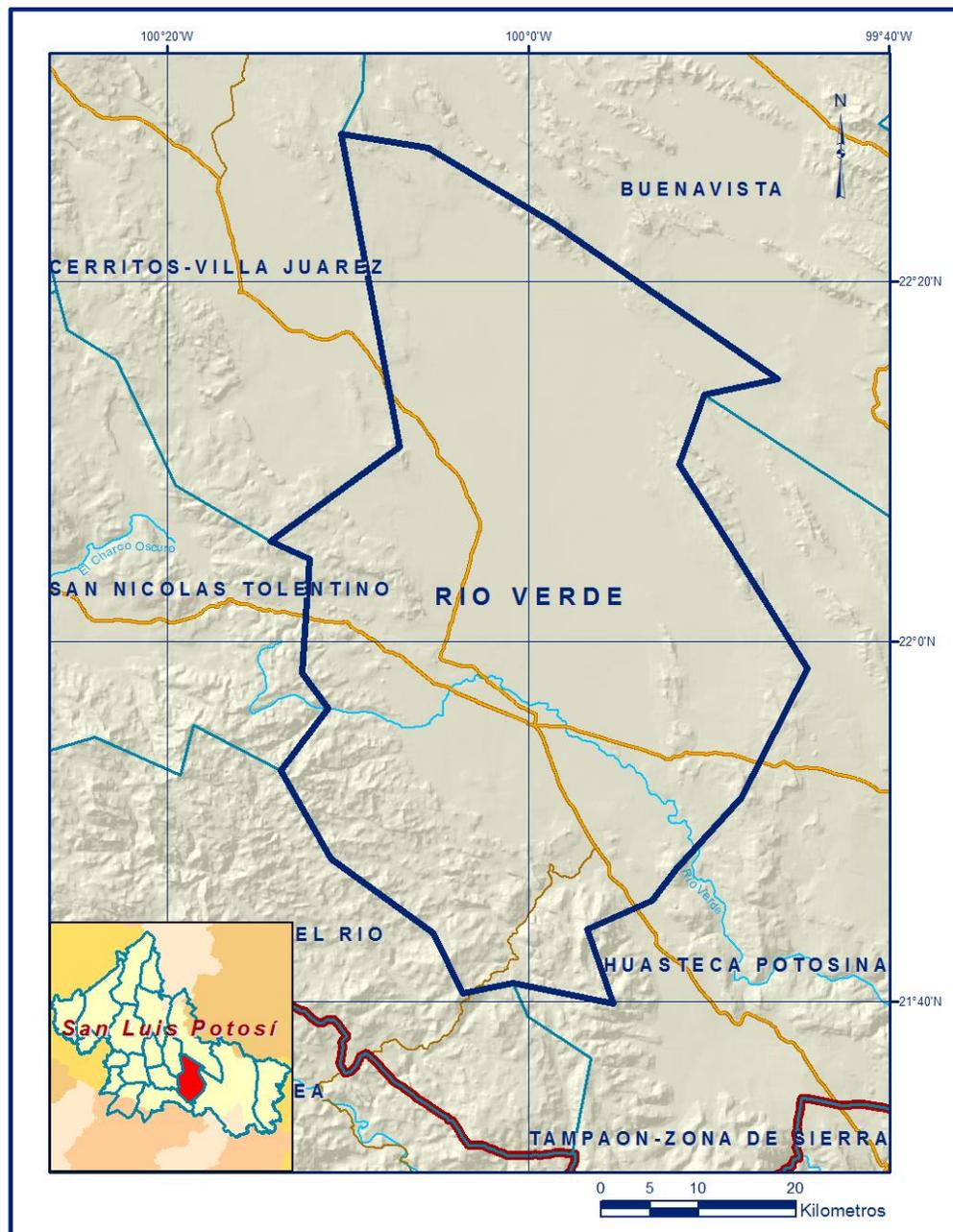


Figura 1. Localización del acuífero.

Geopolíticamente abarca gran parte del municipio Río Verde, parte de Ciudad Fernández y pequeñas porciones de los municipios Cerritos, Villa Juárez, Ciudad del Maíz, Alaquines y Cárdenas.

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.

ACUIFERO 2415 RIO VERDE						
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE		
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS
1	99	58	37.8	22	23	12.7
2	99	46	10.3	22	14	32.5
3	99	50	15.1	22	13	42.3
4	99	51	37.0	22	9	50.3
5	99	44	30.5	21	58	30.7
6	99	48	9.5	21	51	18.2
7	99	51	49.7	21	47	20.1
8	99	53	8.0	21	45	37.9
9	99	56	44.1	21	44	1.9
10	99	55	16.1	21	39	52.4
11	100	0	51.6	21	41	1.8
12	100	3	36.3	21	40	27.9
13	100	5	15.2	21	43	48.8
14	100	10	57.2	21	47	54.6
15	100	13	41.3	21	52	48.9
16	100	11	4.5	21	56	16.1
17	100	12	30.9	21	58	15.2
18	100	12	7.0	22	4	33.8
19	100	14	18.2	22	5	32.5
20	100	7	5.9	22	10	48.2
21	100	10	23.2	22	28	10.4
22	100	5	29.9	22	27	23.0
1	99	58	37.8	22	23	12.7

1.2. Situación administrativa del acuífero

El acuífero Río Verde pertenece al Organismo de Cuenca IX “Golfo Norte” y es jurisdicción territorial de la Dirección Local San Luis Potosí. Está parcialmente vedado; la mayor parte de su territorio se encuentra sujeta a las disposiciones de dos decretos de veda.

El primero de ellos es el “Decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el municipio de Río Verde, en el estado de San Luis Potosí”, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 9 de julio de 1966. Esta veda es de tipo III, en la que la capacidad de los mantos acuíferos permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. El segundo es el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos en el área que ocupa los límites geopolíticos del municipio de Ciudad Fernández S.L.P., para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dicha zona y se establece veda por tiempo indefinido”, publicado en el DOF el 29 de abril de 1981, esta veda es de tipo II, en las que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. Pequeñas porciones de los extremos norte y nororiental, no están vedadas.

La porción no vedada del acuífero Río Verde, clave 2415, 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 175 acuíferos que se indican*”, publicado en el DOF el 5 de abril de 2013, a través del cual en dicha porción del 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 lo establecido por la Ley de Aguas Nacionales, ni se permite el incremento de volúmenes autorizados o registrados previamente por la autoridad, sin la autorización previa de la Comisión Nacional del Agua, hasta en tanto se emita el instrumento jurídico que permita realizar la administración y uso sustentable de las aguas nacionales del subsuelo.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3. El usuario principal del agua es el agrícola. Dentro de los límites del acuífero se localiza el Distrito de Riego 049 “Río Verde”. El 8 de octubre de 2004 quedó constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del acuífero de Río Verde, A.C. El acuífero pertenece al Consejo de Cuenca Río Pánuco, instalado el 26 agosto de 1999.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

En la zona que cubre el acuífero se han realizado algunos estudios hidrogeológicos de evaluación y prospección, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

INFORME DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO PRELIMINAR DE LA ZONA DE RÍO VERDE, ESTADO DE S.L.P. 1972. Realizado por Hidrotec, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

El propósito fundamental del estudio fue obtener un primer conocimiento de los acuíferos existentes en la zona de estudio y llevar a cabo su evaluación preliminar. Entre las actividades de campo realizadas destacan la piezometría, nivelación de brocales, pruebas de bombeo, toma de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímico y ejecución de sondeos geofísicos. Recomienda la perforación de pozos exploratorios para evaluar el potencial de las calizas y la ampliación de las actividades de campo para una evaluación completa que permita definir el régimen de explotación óptimo.

TRABAJOS COMPLEMENTARIOS DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE RÍO VERDE, S.L.P. 1979. Realizado por PROYESCO, S.A., para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Sus objetivos principales fueron investigar las condiciones de explotación y tener un conocimiento más amplio de los acuíferos en el área de estudio. Actualiza las actividades de campo realizadas en el estudio de 1972 e identifica tres áreas favorables para la perforación de pozos exploratorios a profundidades que varían de 150 a 300 m. Identifica agua de alta salinidad, probablemente asociada a la presencia de evaporitas.

ACTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LA ZONA DE RÍO VERDE, S.L.P. 1986. Elaborado por los Ingenieros Ignacio Zavala Leija y Jorge Lara González para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Su objetivo principal fue determinar las condiciones de explotación de agua subterránea y la evolución temporal y espacial de su calidad química. Concluye que para el periodo 1980-1986 se registra un abatimiento máximo de 6, al SW del poblado El Refugio, en el municipio de Ciudad Fernández; que representa un ritmo anual de abatimiento de 1.0 m.

CENSO DE APROVECHAMIENTOS EN EL ACUÍFERO RÍO VERDE 1986-1988. Elaborado por la Delegación Estatal en San Luis Potosí de la Unidad de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Su objetivo específico fue la medición de los niveles del agua subterránea y la obtención de muestras de agua subterránea para análisis fisicoquímicos.

ESTUDIO DE ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA EN EL ACUÍFERO RÍO VERDE, EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A. para la Comisión Nacional del Agua en 2006.

El objetivo general de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas del acuífero, 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, nivelación de brocales de pozos, pruebas de bombeo, ejecución de sondeos geofísicos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas. Los resultados y conclusiones de este estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes

ESTUDIO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD DEL ACUÍFERO SAN NICOLÁS TOLENTINO EN EL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ. Realizado por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para la Comisión Nacional del Agua, en 2010. Este estudio tuvo como objetivo general el conocimiento de la condición geohidrológica del acuífero mediante el diagnóstico y el análisis del comportamiento de los niveles del agua subterránea, para contar con información necesaria para calcular su recarga y determinar la disponibilidad media anual de agua subterránea.

3. FISIOGRAFÍA

3.1. Provincia fisiográfica

El acuífero se ubica dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental (E. Raisz, 1959). De acuerdo con INEGI (1991), el acuífero se ubica en dos subprovincias de la Sierra Madre Oriental: la porción centro y norte en la subprovincia Sierra y Llanuras Occidentales y su extremo sur en la subprovincia o Discontinuidad Carso Huasteco.

La Sierra Madre Oriental es una cordillera cuyo relieve se relaciona con la deformación de rocas mesozoicas y de su complejo basal, que fueron levantados, comprimidos y transportados hacia el noreste, formando pliegues y cabalgaduras durante la Orogenia Laramide.

A lo largo del frente de este cinturón se distinguen varios sectores que tienen variantes internas en el estilo y orientación de deformación; abarca desde la frontera norte del país hasta la provincia del Eje Neovolcánico, en las inmediaciones de Pachuca, Hidalgo.

Tiene una orientación preferencial paralela a la costa del Golfo de México, pero a la altura de Monterrey, N. L., una parte de ella cambia su dirección hacia el oeste para extenderse hasta la Sierra Madre Occidental, al norte de Cuencamé, Durango. Comprende parte de los estados San Luis Potosí, Zacatecas, Durango, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz.

Está conformada por rocas sedimentarias de origen marino, calizas y lutitas, principalmente del mesozoico; cuyos estratos están plegados de manera tal que forman una sucesión de crestas alternadas con bajos topográficos. La elevación promedio del valle es de 1,100 msnm, mientras que las sierras alcanzan elevaciones de hasta 2,400 msnm.

La subprovincia Sierra y Llanuras Occidentales está formada por sierras constituidas principalmente por calizas, orientadas en dirección norte-sur y generalmente unidas entre sí por un conjunto de cerros menores, que tienen esa misma orientación o en sentido oblicuo.

La Sierra de Catorce, al pie de la cual está ubicada la ciudad de Matehuala, define el límite occidental de la subprovincia y es la de mayor importancia y magnitud. La subprovincia Carso Huasteco, como su nombre lo indica, se caracteriza por presentar relieves y formas cársticas, en la que se han desarrollado sistemas de cavernas, grutas y dolinas.

3.2. Clima

De acuerdo con la clasificación del clima de Köppen, modificada por Enriqueta García (1973), para las condiciones de México, en el territorio que cubre el acuífero se presentan tres tipos de clima: en la zona norte el clima es seco-semicálido, mientras que en la región central predomina el clima semiseco-semicálido; en la porción sur domina el clima semicálido-subhúmedo, todos ellos con lluvias en verano.

Para el análisis climatológico se consideraron los datos de 4 estaciones climatológicas que tienen influencia en el área del acuífero: Villa Juárez, Pastora, Río Verde y Pedro Montoya, con un período de observación que comprende el periodo 1980-2004. Mediante el método de polígonos de Thiessen, se determinaron valores promedio anuales de precipitación y temperatura de **484.0 mm y 21.5 °C**, respectivamente. La evaporación potencial es del orden de **1685 mm** anuales.

3.3. Hidrografía

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica 26 "Río Pánuco", Subregión Hidrológica Alto Pánuco, cuenca del Río Tampaón. Su corriente principal es el Río Verde, el cual se origina a 35 km al oriente de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., a una elevación aproximada de 2,600 msnm, en la cordillera que divide la cuenca del Pánuco de la Región Hidrológica 37 (El Salado). Su curso general es en dirección este-sureste, sensiblemente paralelo al Río Santa María, al que confluye por su margen izquierda, a una elevación de 250 msnm. A lo largo de su curso, el Río Verde tiene tres estaciones hidrométricas que dividen su cuenca en tres porciones. La estación Nogal Oscuro cuantifica las aportaciones de la cuenca alta, en la que se localiza el valle del Río Verde, en una longitud de aproximadamente 35 km.

En este valle existen desarrollos agrícolas beneficiados con aguas de este río y de los manantiales Media Luna y Los Anteojitos, ubicados al suroeste de la ciudad de Río Verde.

Aguas abajo de la ciudad de Río Verde, a una elevación de 950 msnm, el río penetra nuevamente a una zona de topografía accidentada, característica que conserva hasta su confluencia con el Río Santa María. A la entrada de la corriente a esta zona, los escurrimientos no aprovechados en el valle de Río Verde son medidos en la estación hidrométrica Vigas. Los volúmenes totales de aportación de la corriente al Río Santa María, se registran en la estación Tanlacut, localizada 10 km aguas arriba de dicha confluencia. Los principales aportadores del Río Verde son los ríos Santa Catarina y Caracol y el Arroyo Rayón

Específicamente en área El Refugio–Ciudad Fernández, principal zona de explotación en el valle del Río Verde, destacan varios afluentes intermitentes de mediana magnitud que representan una fuente de recarga. En estas corrientes o cauces se tienen proyectadas obras para incrementar la recarga, aprovechando su trayectoria y condiciones de permeabilidad. Las corrientes más importantes son los arroyos Morales, Grande, El Sauz y San Rafael, todos ellos tienen su origen en la sierra ubicada al sureste, a una elevación aproximada de 2000 msnm,

El recorrido de los arroyos Morales y Grande es en general de sureste a norponiente, de la zona serrana hacia el río Verde. En cambio, las corrientes de los arroyos El Sauz y San Rafael tienen trayectoria sureste–surponiente y descargan en la Laguna El Jabalí. Estas corrientes son prácticamente las únicas que aportan escurrimientos superficiales al cauce del Río Verde, en su trayecto comprendido entre las estaciones hidrométricas Nogal Oscuro y Vigas.

En la porción norte del valle existen solo escurrimientos efímeros que eventualmente aportan al Río Verde. La precipitación que cae en esta zona se traduce en evapotranspiración y una parte mínima en recarga subterránea, dadas las condiciones climatológicas y la baja permeabilidad. El drenaje presenta patrones dendrítico, paralelo y rectangular, de alta densidad, controlados por la geología y la topografía. El caudal de los arroyos es controlado por las cuencas hidrográficas de los ríos de flujo permanente Santa María y sus afluentes los ríos Verde y Valles, tributarios del Pánuco, que desemboca al Golfo de México.

3.4. Geomorfología

La morfología en la Cuenca Media del Río Verde es resultado de la intensa meteorización, denudación y erosión que ha ocurrido sobre un paisaje originalmente cárstico, afectado por procesos tectónicos de plegamiento, fallamiento, levantamiento y extrusión de paquetes de rocas volcánicas. En la superficie del acuífero se distinguen las siguientes topoformas:

Sierras altas de laderas convexas. Representadas por las sierras El Camarón y La Noria, situadas en la porción occidental del valle; es el elemento de mayor elevación con 2,000 msnm, labrada sobre un anticlinal de calizas de la Formación El Doctor, cubierto por rocas volcánicas, así como la Sierra de Gallinas o El Palote, con elevación máxima de 1,650 msnm, labrada sobre un diapiro de anhidritas, perteneciente a la Formación Guaxcamá, y calizas de la Formación El Doctor, intensamente plegadas.

Sierras bajas alargadas. Están representadas por las sierras de la porción occidental del valle, de menor elevación y formas alargadas orientadas en dirección NW-SE, esculpidas sobre formaciones sedimentarias (calizas, areniscas y lutitas) que alcanzan elevaciones de 1,200 a 1,500 msnm. (El Vetado y Cordón San Francisco).

Lomeríos suaves. Esta unidad se encuentra en la porción septentrional del valle, separando éste del acuífero vecino Cerritos-Villa Juárez, a la altura de La Gavia y La Angostura, en forma de protuberancias aisladas del terreno con altitudes cercanas a los 1,300 msnm. Entre ellos destaca el Cerro El Cabrero por ser el más elevado, así como el Cerro La Boquilla y Cerrito Blanco, labrados sobre rocas basálticas.

Valle. En él se localiza la zona de explotación del agua subterránea. Sobre la margen izquierda del río Verde, presenta su mayor superficie, 20 km de ancho por 40 km de largo, formando una extensa llanura aluvial. En la margen derecha la dimensión de la planicie es menor, 5 km de ancho por 20 de largo aproximadamente, interrumpido por pequeños cerros de contornos redondeados pertenecientes a las calizas de la Formación El Doctor. Su altitud promedio es de 1,000 msnm, en la cual el drenaje es muy pobre. En él existen algunas lagunas, en las inmediaciones de las localidades Ojo de Agua, Rancho Verde, El Jabalí y San Diego.

Cañones. Se presentan en la porción occidental del valle, entre las sierras acordonadas por las que escurren los principales arroyos, a través de los estrechamientos labrados en las rocas.

4. GEOLOGÍA

Geológicamente el acuífero se ubica en la porción centro-occidental de la plataforma cretácica Valles-San Luis Potosí, definida por Carrillo B. J. (1971). Dicha plataforma es un elemento paleogeográfico positivo, constituido por rocas precámbricas, paleozoicas y triásicas, plegadas y falladas; que fue parcialmente cubierta por el mar en el Jurásico Inferior, depositando secuencias siliciclásticas (Figura 2).

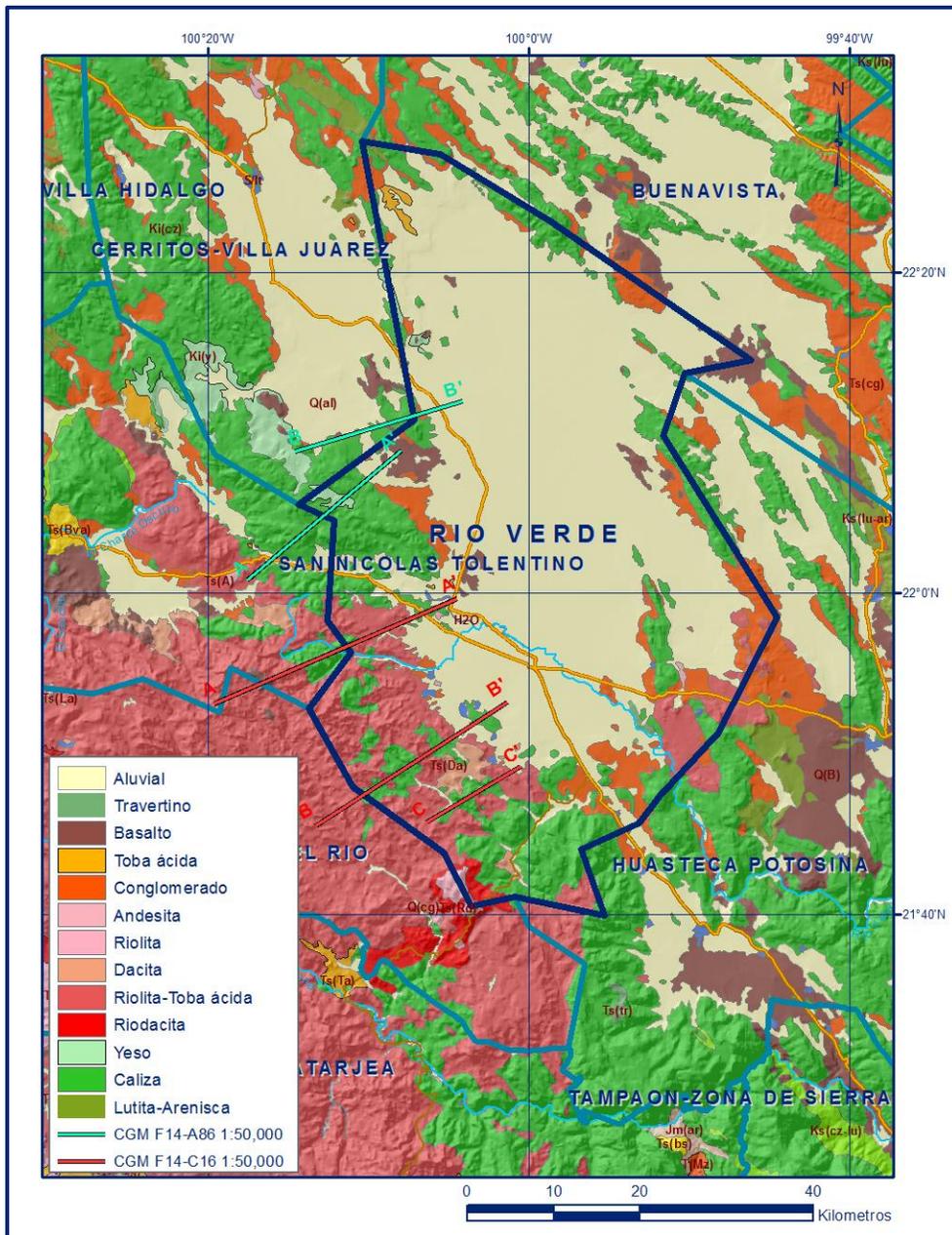


Figura 2. Geología general del acuífero.

La plataforma fue totalmente cubierta durante el Aptiano y sobre ella se depositaron primero evaporitas y después calizas de mar somero, alcanzando su máximo desarrollo en el Cretácico Medio, durante el Albiano-Cenomaniano.

El desarrollo que mostró esta plataforma aislada a partir del Aptiano y durante el Albiano-Cenomaniano en su margen occidental, fue el de una progradación del margen hacia el oeste, con un piso marino de baja pendiente tipo rampa.

Durante el Cretácico Tardío el aporte de terrígenos finos proveniente del oeste modificó la sedimentación primero en la cuenca mesozoica del centro de México (depósito de calizas margosas, margas, limolitas y lutitas) y posteriormente influyó en el régimen sedimentario en la plataforma Valles-San Luis Potosí, provocando una retrogradación del margen de la plataforma y con ello un desplazamiento hacia el este de las facies de talud, margen y laguna interior, así como una variación gradual en los sedimentos depositados.

Durante el Oligoceno-Mioceno se produjo un evento de vulcanismo durante el cual los valles intermontanos se rellenaron de sedimentos lacustres oligomiocénicos y pliocuaternarios, separados unos de otros por una discordancia erosional. El último evento volcánico en la región ocurrió en el Pleistoceno y está representado por la emisión de basaltos, en forma de derrames de lava, conos de escoria y eventos hidrovulcánicos, que regionalmente formaron cráteres de explosión (Joya Honda, La Joyuela) y conos de tobas (Laguna Los Palau).

Durante el Cuaternario se produjo un agrietamiento regional que dio lugar al encauzamiento del Río Verde, que captura todos los escurrimientos del valle y las descargas de los manantiales que brotan de las rocas cársticas. Los sedimentos continentales del Cuaternario están integrados por sedimentos de origen aluvial, lacustre y fluvial, conformados por gravas, arenas, limos y arcillas, así como materiales de origen químico representados por tufas, calizas lacustres, caliches, travertinos y tierras silíceas.

En la actualidad, la erosión y denudación de las estructuras topográficamente elevadas están aportando sedimentos finos a gruesos, que se están depositando en las márgenes de las sierras (coluviones) y rellenando depresiones tectónicas e intermontanas (aluviones).

4.1. Estratigrafía

Los distintos intervalos geológicos que definen la secuencia estratigráfica de la cuenca de Río Verde, se han identificado con las formaciones geológicas que abarcan un intervalo que comprende del Cretácico Inferior al Reciente

La columna estratigráfica del área, está constituida por rocas sedimentarias del Cretácico Inferior representado por la Formación Guaxcamá del Barremiano-Aptiano, el Cretácico Superior por la Formación Tamasopo del Turoniano -Santoniano,

La Formación Cárdenas del Campaniano-Maestrichtiano; el Oligoceno está representado por rocas volcánicas de composición predominantemente ácida como la unidad de riolita-dacita, tobas riolíticas, ignimbritas-riolitas; el final del Oligoceno consiste de derrames de andesitas y basaltos, que conforman la unidad denominada Paleógeno-Neógeno Volcánico.

Del Mioceno Superior al Plioceno afloran unidades terrígenas continentales compuestas por conglomerado polimíctico y arenisca; sobreyaciendo a éstas se tienen arenas y limos. Del Cuaternario son los basaltos, conglomerados polimícticos y por último se presentan los depósitos del aluvión en los arroyos.

A continuación, se describen las distintas unidades litológicas, de la más antigua a la más reciente.

CRETÁCICO

Formación Guaxcamá

Con este nombre se conoce a la secuencia evaporítica de la porción central de la Plataforma de Valles-San Luis Potosí, cuya localidad tipo se ubica a 25 km, al suroeste del poblado de Cerritos, S.L.P., en los alrededores de la mina de Guaxcamá.

Está constituida por yesos y anhidritas bien estratificadas en capas de 5 a 50 cm de espesor, de aspecto sacaroide, de color gris claro a gris oscuro, finamente bandeadas; las bandas son de material arcilloso y la coloración se debe a la presencia de material carbonoso. Intercaladas con los yesos se encuentran calizas microcristalinas y dolomitas de color gris oscuro a pardo oscuro, fétidas y fracturadas. Se le considera un espesor de 3000 m, de acuerdo al Pozo Guaxcamá 1, perforado por Petróleos Mexicanos.

Subyace a las rocas de la Formación El Abra, su contacto inferior no aflora dentro del área, en el subsuelo descansa en aparente concordancia sobre sedimentos de la Formación Valle de Guadalupe y discordantemente sobre sedimentos de la Formación Cahuasas.

Su edad se determinó en el periodo Barremiano-Aptiano, de acuerdo con su contenido fósil de la especie *Colomiella recta*. Cronológicamente, se correlaciona con parte de las formaciones Tamaulipas Inferior, Valle de Guadalupe, Santuario, Taraises, La Peña y con las Calizas Ahuacatlán.

Su depósito ocurrió en una cuenca cerrada, localizada sobre una plataforma separada del mar abierto, probablemente por barreras de tipo orgánico, esto último sugerido por la presencia de rocas arrecifales y post-arrecifales dentro de la secuencia evaporítica. Aflora en los anticlinales Santo Domingo, Guaxcamá y Sierra de Paloma, ubicadas al occidente del acuífero.

Formación el Doctor

Está constituida por calizas de color blanco, gris perla, café crema y gris oscuro, que yacen en capas de estratificación mediana a gruesa, con huellas de disolución y ocasionalmente con horizontes de dolomitas. Se caracteriza por presentar estructura densa y compacta, con fracturamiento, intemperización y erosión intensa.

Presenta amplia distribución en la superficie del acuífero, sus principales afloramientos se ubican al sureste de la Sierra del Maíz; al norte de La Libertad, Palomas, Grangenal y Cerritos; al occidente conforman las Sierras Villa Juárez, Progreso, Diego Ruíz y Gallinas; en el sur está expuesta en Tuna Mansa, El Conche, San Ciro y Milpillas; persisten como remanentes de erosión de la formación las Sierras Las Tablas y La Peña; entre los poblados La Morita y La Libertad. Su espesor en la localidad es desconocido; en las inmediaciones de San Luis Potosí se reporta un espesor de 1000 m y 2000 m, entre Cárdenas y Tamasopo.

Formación Tamasopo

Constituida por calizas de color gris claro, de estratificación media, con presencia de microfósiles y con vetillas de calcita sin dirección preferencial. Su espesor varía de 300 a 400 m. En los trabajos Petróleos Mexicanos está dividida en dos miembros: Inferior y Superior. Está expuesta en la porción noroccidental en donde manifiesta claramente una orientación preferencial NW-SE.

Se correlaciona con la Formación San Felipe, con la parte media e inferior de la Formación Caracol y con parte de la Formación Soyatal. Sus sedimentos fueron depositados sobre una plataforma, en aguas someras y cálidas con alta energía, alejadas de las fuentes de material terrígeno.

Formación Cárdenas

Es una secuencia de lutitas de color gris a café amarillento, que intemperiza a café ocre, dispuesta en capas de 5-20 cm de espesor, de grano fino a medio; intercaladas con algunos horizontes de margas y areniscas de grano fino color crema, dispuestas en estratos de 10 a 30 cm.

Su espesor varía de 80 a 100 m y su localidad tipo se localiza en las cercanías de la estación del Ferrocarril Cárdenas, S.L.P. Sus afloramientos se localizan en la región oriente del acuífero, en las sierras San Francisco, El Vaquero, Lomas de Coyote, Cárdenas y Alaquines.

Cubre concordantemente a sedimentos de la unidad Tamasopo (Miembro Superior) y subyace en forma discordante a depósitos recientes y a los derrames ígneos. Por su contenido microfaunístico se le asigna una edad Campaniano-Maestrichtiano.

Se correlaciona con las formaciones Mezcala, Méndez y la parte alta de La Formación Caracol. Su depósito ocurrió durante una regresión, en aguas poco profundas y de alta energía con aporte de material terrígeno.

PALEÓGENO-NEÓGENO

Terciario Volcánico

Bajo esta denominación se agrupan las emisiones ígneas ácidas y básicas del Terciario Superior representados por riolitas, andesitas, dacitas y basaltos. Los afloramientos de riolitas son los más abundantes y se presentan en la porción suroccidental y sur del acuífero, en donde cubren discordantemente a las calizas de la Formación El Doctor.

Las rocas basálticas se distribuyen de manera aislada en la región noreste y occidental, en forma de lomeríos y cerros. Son vesiculares, de textura holocristalina intergranular y por lo general contienen olivino, alterado a idingsita

CUATERNARIO

Conglomerados polimícticos

Presentan por lo general fragmentos constituidos de rocas sedimentarias que varían en tamaño de arenas hasta cantos, de formas redondeadas a subredondeadas, con cementante arcillo-arenoso.

Se presentan mal consolidados y sobreyacen discordantemente a las rocas más antiguas, principalmente a las del Cretácico. Están expuestos principalmente en la porción centro-occidental y suroriental del acuífero.

Aluvión

El aluvión está formado por sedimentos aluviales de granulometría variada, producto de la erosión a la que han sido sometidas las rocas y sedimentos del área; principalmente en los cauces de los ríos, arroyos y en toda la planicie aluvial que constituye el valle. Su distribución es amplia en la porción centro y norte del acuífero.

Este conjunto de características muy heterogéneas, está compuesta principalmente por dos tipos de depósito; los de origen mecánico son clásticos de medios lacustres y fluviales con dimensiones de gravas, arenas, limos y arcillas; y los de origen químico están representados por tufas, calizas lacustres, caliches, travertinos y tierras silíceas.

Los de origen fluvial se identifican en las cercanías del Río Verde y ambos márgenes de los arroyos que descienden de las sierras que delimitan el valle. En la estribación de la sierra de Villa Juárez, los rellenos provienen de calizas lacustres intemperizadas y se encuentran mezclados con depósitos de acarreo reciente.

Los depósitos de origen lacustre se localizan en la región central de la cuenca, entre los poblados de San Bartolo y Río Verde, en la subcuenca de San Ciro, dentro del Valle de Palomas y La Libertad.

En las inmediaciones del manantial Media Luna, ubicado en la margen derecha del Río Verde, se tienen afloramientos de tufas y calizas lacustres, capas de travertino; de tonos amarillentos y alta porosidad. En la margen izquierda, existen extensas capas de caliche de origen residual, que sobreyacen a suelos con alto contenido de sílice compacto. El espesor de este conjunto heterogéneo se ha estimado en 150 m; entre las localidades Pastora y San Francisco.

4.2. Geología estructural

La región en la que se ubica el acuífero se encuentra dentro de dos ambientes geológico –estructurales: la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Planicie Costera de Golfo.

La primera se caracteriza por la abundancia de plegamientos cuyos ejes de simetría presentan una orientación general NW-SE y N-S, algunos de ellos afectados por fallas inversas o cabalgaduras, resultado de procesos de subducción desarrollados a fines del Cretácico y principios del Terciario (Pérez y Benítez, 1990) en el occidente del continente.

La Planicie Costera del Golfo presenta estructuras de tipo anticlinal y sinclinal con el mismo rumbo general NW-SE. Las estructuras de mayores dimensiones se localizan en la porción sur-central de la región del Anticlinorio de Huayacocotla y en el Anticlinorio Pisa Flores. Durante el Terciario, principalmente en el Eoceno, se llevó a cabo el emplazamiento de cuerpos ígneos (troncos) originados por una fase distensiva que originó fallas, fosas y pequeños plegamientos con orientación NW-SE (Carta Geológico-Minera Ciudad Valles F14-8. Escala 1:250000, SGM, 1997).

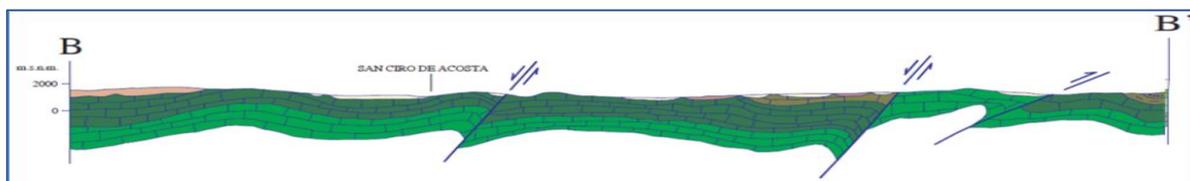
La geología estructural de la zona puede reconstruirse a partir de las rocas sedimentarias marinas de edad cretácica que constituyen los límites de la cuenca, originados por el plegamiento de las secuencias de rocas marinas, formando una serie de anticlinales y sinclinales normales y recumbentes.

Posterior a los eventos del plegamiento regional, al final del Cretácico, los fenómenos denudatorios en las tierras emergidas propiciaron el relleno de la cuenca hasta su configuración actual. Después de la intensa erosión registrada, iniciaron las emisiones basálticas que establecieron el cierre superficial de la cuenca hacia el sur, tal como se registra en la actualidad; finalmente, los depósitos de caliche y los de origen químico, se originaron en condiciones de extrema aridez.

Establecida esta consideración de carácter estructural en superficie con la prospección geofísica, se determinó una continuidad de dichas estructuras en el subsuelo del valle; principalmente en lo que corresponde a las emisiones de composición ácida y básica, sedimentos arcillo calcáreos con materiales evaporíticos y aparentemente rocas calcáreas subyacentes, a profundidades de 100 a 300 m.

4.3. Geología del subsuelo

De acuerdo con la información geológica y geofísica recabada en el acuífero y por correlación con acuíferos vecinos, es posible definir que el acuífero se encuentra alojado, en su porción superior, en los sedimentos fluviales, aluviales, lacustres y conglomerados que constituyen el lecho y la llanura de inundación del Río Verde, arroyos y abanicos aluviales, cuyo espesor varía desde algunos metros en las estribaciones de la sierra, incrementándose ligeramente en las inmediaciones de los cauces de los ríos y arroyos, hasta alcanzar algunas centenas de metros en el centro de los valles. Esta es la unidad que actualmente se explota para satisfacer las necesidades de agua de la región. La porción inferior se aloja en un medio fracturado conformado por rocas sedimentarias calizas, volcánicas y vulcanosedimentarias, que presentan permeabilidad secundaria por disolución y fracturamiento, respectivamente; cuyo espesor puede alcanzar algunas centenas de metros (figura 3).



Fuente: Carta Geológica-Minera "Ciudad Valles" Esc. 1:250,000 (SGM, 1997).

Figura 3. Sección geológica esquemática.

Las fronteras y barreras al flujo subterráneo están representadas por las mismas rocas sedimentarias y volcánicas cuando a profundidad desaparece el fracturamiento. A mayor profundidad las calizas constituyen horizontes acuíferos que pueden presentar condiciones de confinamiento debido a que están interestratificadas con lutitas y limolitas. El basamento geohidrológico regional está constituido por los conglomerados compactos de la Formación Cahuasas, que no aflora dentro de la superficie del acuífero, y por una secuencia de anhidritas, yesos calizas y DI, de gran espesor, se depositó en un ambiente marino de baja energía.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Tipo de acuífero

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, las evidencias geofísicas e hidrogeológicas, es posible definir la presencia de un acuífero **tipo libre** heterogéneo y anisótropo, constituido por dos medios: el superior de tipo granular y el inferior fracturado.

El medio granular poroso está conformado por los depósitos no consolidados y semi-consolidados que incluyen materiales clásticos y conglomerados de granulometría diversa, originados a partir del intemperismo y erosión de las diversas unidades geológicas que afloran en la zona; estos materiales presentan permeabilidad media a alta y se ubican en la proximidad del cauce del Río Verde y arroyos, así como en la planicie aluvial, en donde alcanzan su mayor espesor que es de algunas centenas de metros.

El medio fracturado está constituido por rocas sedimentarias, volcánicas y vulcanosedimentarias que presentan porosidad secundaria por disolución (en las calizas) y fracturamiento. A mayor profundidad, las calizas pueden alojar un acuífero **semiconfinado o confinado**, debido a que las secuencias calcáreas alteran con sedimentos arcillosos.

5.2. Parámetros hidráulicos

Como parte del estudio realizado en el 2006, se llevaron a cabo 14 pruebas de bombeo de corta duración, tanto en etapa de abatimiento como de recuperación. Adicionalmente se tomaron en cuenta las 25 pruebas de bombeo realizadas en 1972 (SRA).

De los resultados de la interpretación por métodos analíticos convencionales se establece que los valores de transmisividad varían de **1.4×10^{-4} a $2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$** . Los valores más altos corresponden a los depósitos aluviales de granulometría gruesa que conforman el cauce del río y arroyos, y los más bajos a sedimentos o rocas arcillosas. De acuerdo con el espesor saturado la conductividad hidráulica varía de **$7.14 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ a $7.03 \times 10^{-5} \text{ m/s}$** . Sólo dos pruebas de bombeo contaron con pozo de observación, en los que se obtuvo un coeficiente de almacenamiento **S de 0.0002**. Para el balance de aguas subterráneas, en la zona de explotación, se consideró un rendimiento específico **S_y de 0.1**.

5.3. Piezometría

Existe información piezométrica desde la década de los 70's, sin embargo, no es continua en el tiempo ni abarca toda la superficie de explotación. La información considerada para el análisis piezométrico corresponde al periodo 1998-2006.

5.4. Comportamiento hidráulico

Para el análisis del comportamiento hidráulico del acuífero se tomó en cuenta la información piezométrica que corresponde a los años 1998 y 2006, en los que se tiene una mayor cobertura espacial.

5.4.1. Profundidad al nivel estático

Para 2006 la profundidad al nivel estático variaba desde algunos metros, registrados en la zona cercana al cauce del Río Verde y algunos arroyos, hasta 50 m, conforme se asciende topográficamente hacia los piedemontes (figura 4)..

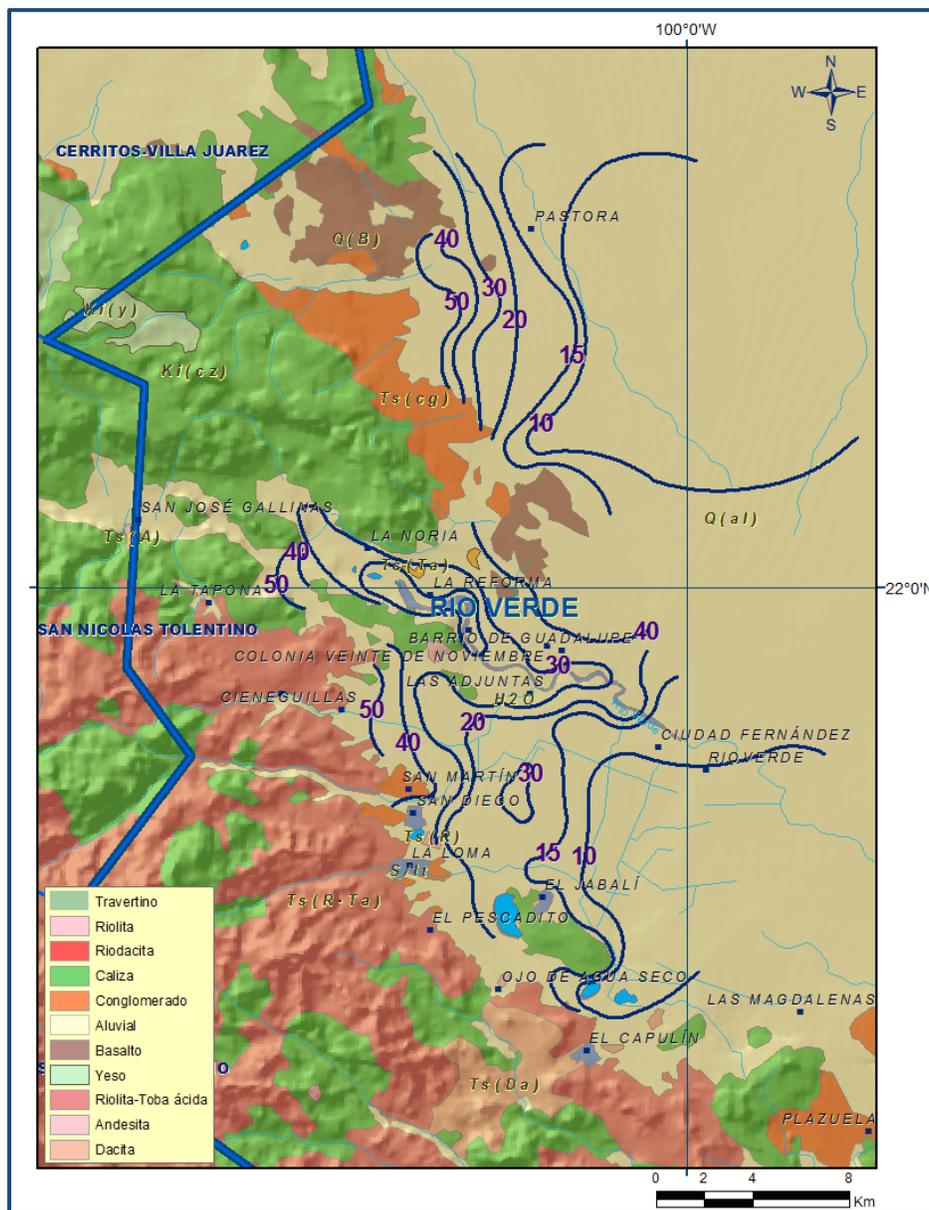


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2006).

Los valores más someros se presentan en la porción centro-occidental del acuífero y los más profundos hacia las estribaciones de las sierras que delimitan el acuífero, en las inmediaciones del poblado Ojo de Agua de Solano.

Entre El Refugio, La Loma y El Coyote, se registran profundidades que varían de 10 a 20 m; entre Ciudad Fernández y La Noria varían de 20 a 30 m, en tanto que entre El Jabalí y San Diego se registran profundidades de 30 a 40 m.

5.4.2. Elevación del nivel estático

La elevación del nivel estático en 2006 registra valores que varían de 1015 a 970 msnm, decreciendo de las zonas topográficamente más altas hacia las más bajas de la planicie aluvial y hacia el cauce del río Verde; mostrando de esta manera, al igual que la profundidad, el efecto de la topografía y evidenciando la dirección preferencial del flujo subterráneo en dirección noroeste-sureste, paralela al escurrimiento del Río Verde, con alimentaciones provenientes de las porciones norte y sur (figura 5).

Se identifican dos conos de abatimiento en las zonas de concentración de la extracción de agua subterránea.

Uno se localiza entre las poblaciones Ciudad Fernández y Río Verde, definido por la curva de elevación 970 msnm, y el otro se ubica al norte de la carretera que comunica las poblaciones Cerritos y Río Verde, definido por la curva de elevación de 1000 msnm, en donde se ha establecido una comunidad menonita.

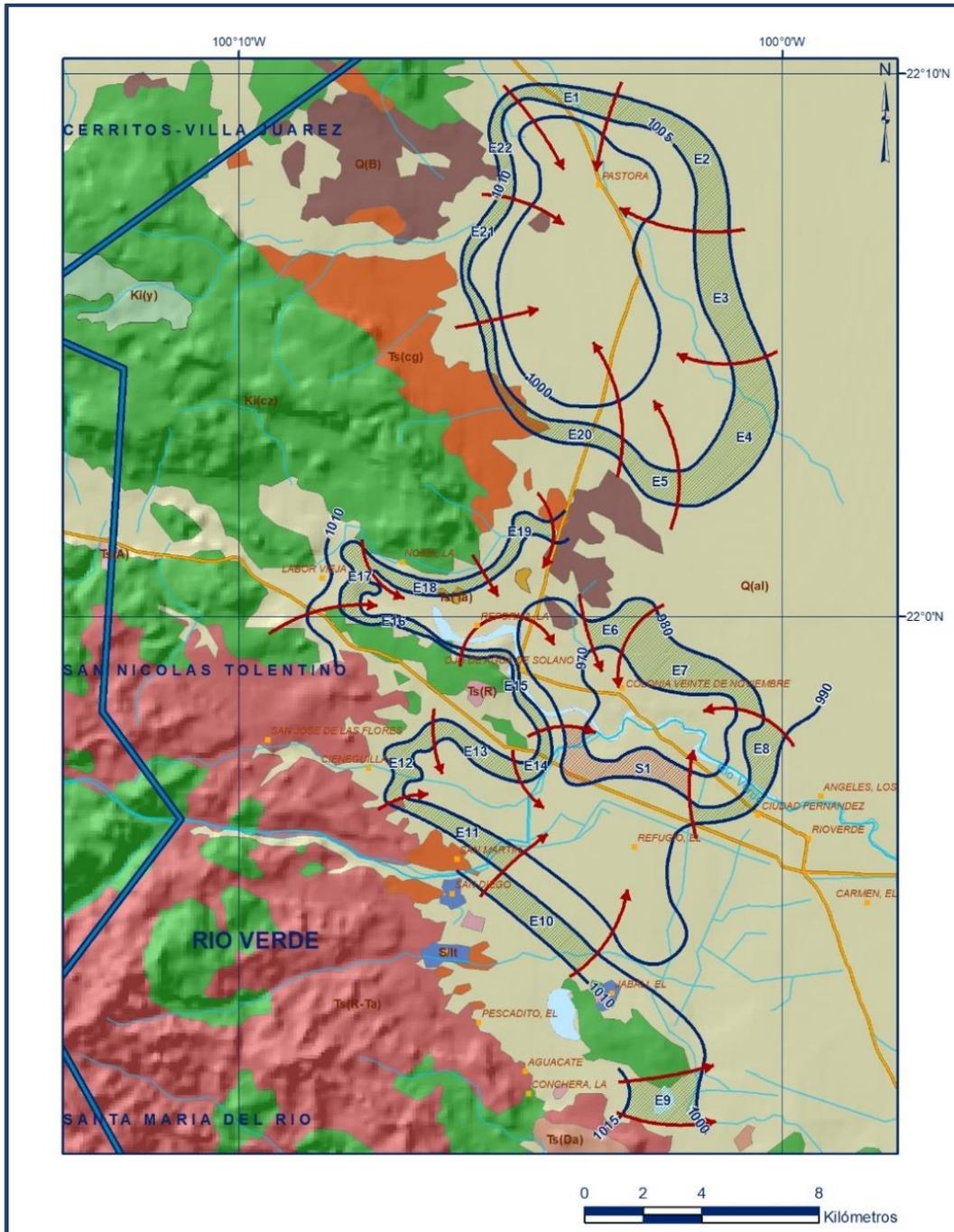


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2006).

5.4.3. Evolución del nivel estático

Con respecto a la evolución del nivel estático para el periodo 1998-2006, únicamente se registran abatimientos en la zona ubicada entre los poblados San Diego y El Jabalí, de 2 a 10 m, que representan un ritmo anual de 0.25 a 1.25 m (figura 6).

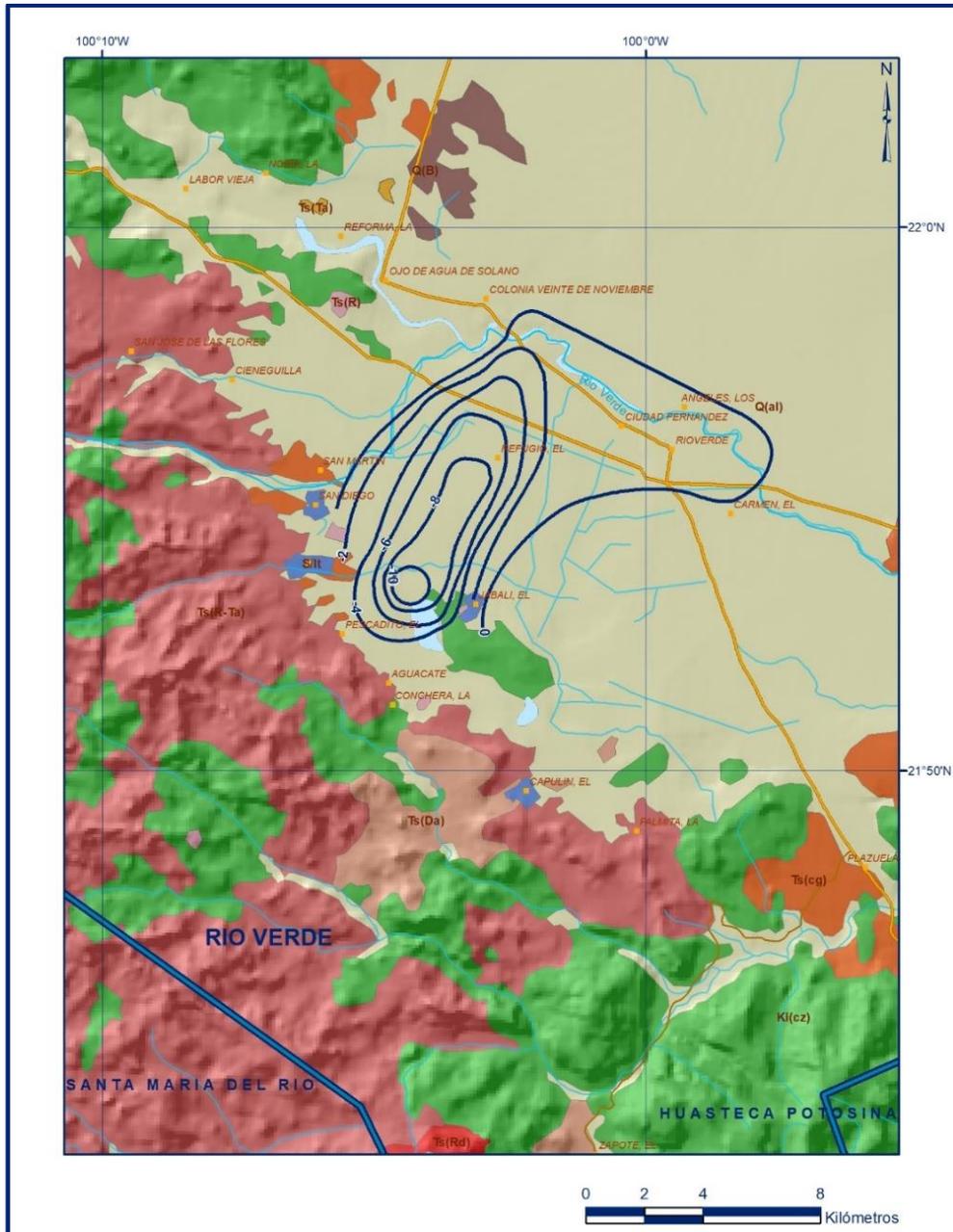


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1998-2006).

En la superficie restante del acuífero no se registran cambios significativos en la profundidad de los niveles del agua subterránea, por lo que el cambio de almacenamiento tiende a ser nulo.

5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Como parte de los trabajos de campo del estudio realizado en el año 2006, se tomaron muestras de agua en 20 aprovechamientos para su análisis fisicoquímico correspondiente.

Las determinaciones incluyeron iones principales, temperatura, conductividad eléctrica, pH, dureza total, sólidos totales disueltos, entre otros. Adicionalmente, en 302 aprovechamientos se realizaron determinaciones en campo de temperatura, pH, conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos.

De los resultados de los análisis se determinó, de manera general, que las concentraciones de los diferentes iones y elementos no sobrepasan los límites máximos permisibles que establece 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. La concentración de sólidos totales disueltos (STD) varía de 150 a 3250 mg/lit. Los valores más altos se registraron en la porción occidental y suroccidental del acuífero, confirmando las direcciones preferenciales del flujo subterráneo noroeste-sureste y oeste-este.

Concentraciones menores de 1000 mg/l de STD se registran en la margen derecha del Río Verde, desde La Noria hasta Ciudad Fernández, donde el agua circula a través de sedimentos granulares.

Los valores más altos de concentración de STD se presentan hacia el poblado 20 de noviembre y hacia el manantial Media Luna; al oriente de esta zona se registran concentraciones mayores de 1800 mg/l, que coinciden con valores fuera de la norma de las concentraciones de carbonatos, calcio, magnesio y potasio, por lo que se infiere que el agua subterránea circula a través de las calizas que son su fuente de recarga. El abatimiento de los niveles del agua subterránea que se origina al sureste de El Refugio está induciendo la migración de agua de mayor salinidad hacia el poblado El Jabalí

De acuerdo con los valores de conductividad eléctrica obtenidos, que varían de 2500 a 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el agua del acuífero se clasifica como agua dulce a salobre. La temperatura del agua medida en los sitios de muestreo varía de 24 a 30 °C; en tanto que el pH, varía de 7.0 a 7.9.

Con respecto a las concentraciones de elementos mayores por ion dominante, la familia del agua que predomina es la bicarbonatada-cálcica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), que representa agua meteórica de reciente infiltración que ha circulado a través de rocas calizas.

De manera general, se considera que el agua subterránea es apropiada para riego, ya que presenta salinidad baja a media y contenido bajo de sodio intercambiable.

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 2006, se registraron un total de 575 aprovechamientos de agua subterránea: 470 están activos y 105 inactivos. De los aprovechamientos activos, 407 son pozos, 62 norias y 1 manantial. El volumen estimado de extracción conjunta asciende **95.8 hm³ anuales**, de los cuales 81.9 hm³ (85.5%) se destinan a las actividades agrícolas y 13.9 hm³ (14.5%) para uso público-urbano de las diferentes localidades de la región.

Adicionalmente, a través del manantial “Media Luna” se descarga un volumen anual de 135.3 hm³ (4290 Ips), destinados al uso agrícola en el Distrito de Riego 049 “Río Verde”. Aunque recientemente ha disminuido la aportación del manantial al Distrito de Riego 049 y algunos manantiales más pequeños han desaparecido, la fuente de recarga de esta unidad calcárea sigue siendo muy importante; manteniendo la actividad agrícola en esta región, así como descargas importantes al Río Verde, las cuales son aforadas en la estación hidrométrica Vigas.

7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El balance de aguas subterráneas se planteó para el período 1998-2006, en una superficie de **504 km²**, en la que están dispersos los aprovechamientos.

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:

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

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

Recarga total – Descarga total = Cambio de almacenamiento

7.1. Entradas

De acuerdo con el modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del acuífero, la recarga natural ocurre por dos procesos naturales principales: por infiltración de agua de lluvia en el valle, por infiltración de los escurrimientos a lo largo de los arroyos principales, que en conjunto se consideran como recarga vertical (Rv), y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo subterráneo (Eh). De manera inducida, 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 fugas en las redes de distribución de agua potable, constituyen otra fuente de recarga al acuífero.

Estos volúmenes se integran en la componente de recarga inducida (Ri). Para este caso, dado que no existen poblaciones urbanas importantes, sólo se considera recarga inducida debida a los retornos del riego agrícola (Rr).

7.1.1. Recarga vertical (Rv)

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

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

Donde:

- Rv:** Recarga vertical natural
- Rr:** Recarga inducida por riego
- Eh:** Entradas por flujo subterráneo horizontal
- Sh:** Salidas por flujo subterráneo horizontal
- B:** Extracción o bombeo
- ETR:** Evapotranspiración real
- Dm:** Descarga por manantiales
- Fb:** Flujo base
- $\Delta V(S)$:** Cambio de almacenamiento

Despejando la recarga vertical natural (Rv), se obtiene:

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

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 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.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. Para el cálculo de las entradas por flujo subterráneo horizontal se utilizó la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2006, mostrada en la figura 5.

Con base en esta configuración se seleccionaron canales de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal "Q" en cada uno de ellos, mediante la siguiente expresión:

$$Q = T * B * i$$

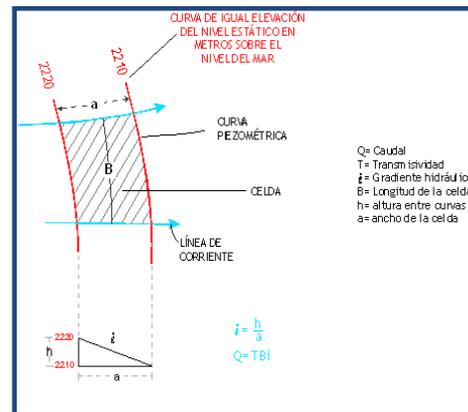
Donde:

Q = Caudal (m³/s)

T = Transmisividad (m²/s)

B = Longitud de la celda (m)

i = Gradiente Hidráulico (adimensional)



La recarga total por flujo subterráneo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos, en la tabla 2 se pueden observar los valores obtenidos en cada celda.

El volumen total de entradas por flujo subterráneo horizontal asciende a **33.4 hm³/año**.

Los valores de transmisividad utilizados para el cálculo de las entradas y salidas subterráneas son los promedios obtenidos de la interpretación de pruebas de bombeo, adaptadas al espesor saturado en cada zona.

Tabla 2. Cálculo de entradas por flujo subterráneo horizontal (2006).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
E1	3510	730	5	0.0068	0.0010	0.0240	0.8
E2	6880	1315	5	0.0038	0.0010	0.0262	0.8
E3	4390	1465	5	0.0034	0.0010	0.0150	0.5
E4	2195	730	5	0.0068	0.0010	0.0150	0.5
E5	5415	1755	5	0.0028	0.0010	0.0154	0.5
E6	2925	1465	10	0.0068	0.0025	0.0499	1.6
E7	5120	1170	10	0.0085	0.0025	0.1094	3.5
E8	4390	730	10	0.0137	0.0008	0.0481	1.5
E9	1755	1315	15	0.0114	0.0010	0.0200	0.6
E10	4680	880	10	0.0114	0.0015	0.0798	2.5
E11	4390	585	10	0.0171	0.0010	0.0750	2.4
E12	2925	585	10	0.0171	0.0010	0.0500	1.6
E13	2925	1025	10	0.0098	0.0010	0.0285	0.9
E14	1900	730	10	0.0137	0.0010	0.0260	0.8
E15	4100	440	10	0.0227	0.0015	0.1398	4.4
E16	4100	730	10	0.0137	0.0015	0.0842	2.7
E17	2195	1170	10	0.0085	0.0010	0.0188	0.6
E18	4100	585	10	0.0171	0.0010	0.0701	2.2
E19	3220	730	10	0.0137	0.0010	0.0441	1.4
E20	7315	585	5	0.0085	0.0010	0.0625	2.0
E21	4830	730	5	0.0068	0.0010	0.0331	1.0
E22	3660	730	5	0.0068	0.0010	0.0251	0.8
TOTAL						33.4	

7.1.3. Recarga inducida (Rr)

Aún en sistemas de riego muy eficientes, un cierto volumen del agua aplicada en el riego no es usado como uso consuntivo, sino que 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 superficies y lámina de riego, esta componente se calculó tomando en cuenta el volumen de agua para uso agrícola y considerando un factor de infiltración de 20%. De esta manera, el volumen de agua destinada a las actividades agrícolas es de 217.2 hm³ anuales, de los cuales 81.9 hm³ son de aguas subterráneas y 135.3 hm³ corresponden al agua superficial de la descarga del manantial Media Luna. De esta manera, $R_r = 217.2 \text{ hm}^3 (0.2) = 43.4 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$.

7.2. Salidas

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B), por flujo horizontal subterráneo (Sh), por evapotranspiración (ETR), Flujo base (Fb) y la descarga a través de manantiales (Dm).

7.2.1. Extracción por bombeo (B)

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el volumen de extracción reportado es de **95.8 hm³/año**.

7.2.2. Evapotranspiración (ETR)

La evapotranspiración 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).

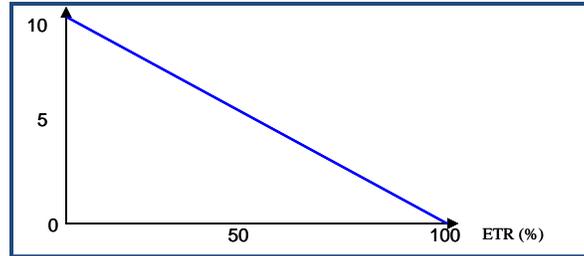
Para la obtención de este parámetro se puede utilizó la ecuación empírica de Turc, que se muestra a continuación:

$$ETR(mm) = \frac{P(mm)}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2(mm)}{L^2}\right)}} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

T (°C) =	21.5	P ² =	234256
P(mm) =	484	L ² =	1780673.4
L =	1334.41875		
ETR (mm)	476.5		

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, 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.



De esta manera, la estimación del valor de la evapotranspiración se calculó multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por la lámina de evapotranspiración obtenida y por el % que le corresponde de acuerdo con la gráfica anterior.

Tomando en cuenta una superficie de 227.3 km², en la que la profundidad media al nivel del agua subterránea es de 3 m, con cobertura vegetal, y con una lámina de evapotranspiración de 476.5 mm (obtenida con valores anuales de 484 mm para la precipitación y 21.5 °C de temperatura), de acuerdo con la gráfica:

$$\text{ETR} = 227.3 \text{ km}^2 (0.4765 \text{ m}) (0.7) = 75.8. \text{ Por lo tanto, la } \mathbf{ETR = 75.8 \text{ hm}^3/\text{año}}.$$

7.2.3. Descarga a través de Manantiales (Dm)

La descarga media del manantial es de 4290 lps, que representan un volumen anual de 135.3 hm³ anuales. **Dm = 135.3 hm³ anuales**

7.2.4. Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de la configuración de elevación del nivel estático, mostrada en la figura 5. En la tabla 3 se muestra el detalle del cálculo y el valor total de entradas por flujo subterráneo, que es de **3.2 hm³/año**.

Tabla 3. Cálculo de las salidas por flujo horizontal (2006).

CELDA	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	h_2-h_1 (m)	Gradiente i	T (m ² /s)	CAUDAL Q (m ³ /s)	VOLUMEN (hm ³ /año)
S1	5855	860	10	0.0116	0.0015	0.1021	3.2
TOTAL							3.2

7.2.5. Flujo base (Fb)

De acuerdo con los datos de la estación hidrométrica Vigas, el volumen promedio del flujo base del Río Verde en temporada de estiaje es de 3580 Ips, que representa un volumen anual de 112.9 hm³. Por lo tanto, **Fb = 112.9 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 1998-2006 (figura 6).

Con base en ella y considerando un rendimiento específico Sy = 0.1, se determinó la variación del almacenamiento en el área de balance de 504 km², 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 de influencia de curvas de igual evolución del nivel estático (km²);

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

Sólo en una superficie de 145.5 km² se registran abatimientos, en la superficie restante los niveles del agua subterránea no muestran cambios significativos en su posición a lo largo del tiempo.

En la tabla 4 se muestra el detalle de la estimación del cambio de almacenamiento, cuyo valor medio anual para el periodo 1998-2006 es de -7.2 hm³. Por lo tanto **ΔV(S) = - 7.2 hm³ anuales**.

Tabla 4. Cálculo del cambio de almacenamiento

Evolución (m)	Evolución media (m)	Área (km ²)	Sy	ΔV(S) (hm ³ /año)
-10	-10	5.2	0.1	-5.2
-10 a -8	-9	15.6	0.1	-14.0
-8 a -6	-7	20.3	0.1	-14.2
-6 a -4	-5	25.2	0.1	-12.6
-4 a -2	-3	18.4	0.1	-5.5
-2 a 0	-1	60.8	0.1	-6.1
	TOTAL	145.5	TOTAL	-57.7
		Promedio anual		-7.2

Solución a la ecuación de balance

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

$$\begin{aligned} R_v &= S_h + B + ETR + D_m + F_b \pm \Delta V(S) - E_h - R_r \\ R_v &= 3.2 + 95.8 + 75.8 + 135.3 + 112.9 - 7.2 - 33.4 - 43.4 \\ R_v &= 339.0 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la recarga total es igual a la suma de todas las entradas:

$$\begin{aligned} R &= R_v + E_h + R_r \\ R &= 339.0 + 33.4 + 43.4 \\ R &= 415.8 \text{ hm}^3/\text{año} \end{aligned}$$

8. DISPONIBILIDAD

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

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

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. Para este caso, su valor es de **415.8 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 = 251.4 hm³ anuales.**

8.3 Volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS)

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

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

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **147,272,948 m³ anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022.**

8.4 Disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

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

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

$$\begin{aligned} \text{DMA} &= \text{R} - \text{DNC} - \text{VEAS} \\ \text{DMA} &= 415.8 - 251.4 - 147.272948 \\ \text{DMA} &= 17.127052 \text{ hm}^3/\text{año.} \end{aligned}$$

El resultado indica que existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones de **17,127,052 m³ anuales.**

9. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional del Agua. 2006. Estudios de Actualización Geohidrológica en el Acuífero Río Verde, en el Estado de San Luis Potosí. Realizado por Desarrollo y Sistemas, S.A.

Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1972. Informe del Estudio Geohidrológico Preliminar de la Zona de Río Verde, Estado de S.L.P. Realizado por Hidrotec, S.A.