
EVOLUCIÓN RECIENTE DEL APROVECHAMIENTO DEL ACUÍFERO RIOVERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

FRANCISCO AGUILAR ORTEGA, HILARIO CHARCAS SALAZAR, JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA Y JOSÉ LUIS FLORES FLORES

RESUMEN

El análisis de los datos históricos del conocimiento de la recarga, descarga y el desequilibrio hidrológico resultante, permiten explicar la conformación del acuífero Rioverde. Este artículo ordena y sintetiza a partir de estudios geohidrológicos, de censos agrícolas y de población, las características más relevantes de los acuíferos superficial y profundo de los manantiales, así como del aprovechamiento del agua subterránea, con fines agrícolas y para el abastecimiento de la población rural y urbana,

pertenecientes al acuífero Rioverde. Los resultados muestran un acuífero con un aprovechamiento incipiente en aguas freáticas abundantes hasta uno con una extracción intensiva con un aprovechamiento de aguas freáticas y profundas. Así mismo se observa una gran incertidumbre en cuanto a su disponibilidad, ya que los valores de la recarga varían ampliamente. En la extracción se incrementa el número de pozos, que generan abatimientos y desaparición y reducción de caudales de manantiales.

Introducción



El acuífero de Rioverde se encuentra en la porción sureste del estado de San Luis Potosí, México. Comprende fracciones de los municipios de Rioverde, Ciudad Fernández, Villa Juárez y Cerritos. Sus límites naturales son: noroeste, sierras La Noria y El Tablón; noreste, sierra

Cordón de San Francisco; sureste, sierra La Lágrima; suroeste, sierras El Jabalí, San Diego y Cieneguilla (Figura 1). El clima varía de seco semicálido al noreste a semicálido subhúmedo en el suroeste (Campos, 1993; García, 2004; INEGI, 2006).

El acuífero Rioverde, es del tipo libre heterogéneo y anisótropo, constituido por diferentes sistemas de flujo o bien dos medios. El superior (superficial,

de recarga local) de tipo granular, está constituido por materiales ígneos y sedimentarios y el inferior (profundo, de recarga local y regional) fracturado en rocas calizas de la formación El Doctor y Guaxcamá (INEGI, 2002; CONAGUA, 2020).

Debido a su aprovechamiento, el acuífero Rioverde presenta un desequilibrio entre las áreas de su recarga y extracción: i) descenso del nivel freático general y profundización de los

PALABRAS CLAVE / Acuífero / Agua Subterránea / Bombeo de Pozos / Evolución / Rioverde / Pequeños Regadíos / San Luis Potosí /

Recibido: 28/11/2023. Modificado: 06/02/2024. Aceptado: 09/02/2024.

Francisco Aguilar Ortega (Autor de correspondencia). Ingeniero Civil y Maestro en Planeación de Recursos Hidráulicos, Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), México. Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México. Docente-Investigador, Unidad Académica de Ingeniería 1, UAZ, México. Dirección: Av. Ramón López Velarde No. 801, Col. Centro, C.P. 9800, Zacatecas, México. e-mail: francisco.aguilar@uaz.edu.mx.

Hilario Charcas Salazar. Ingeniero Agrónomo Fitotecnista, UASLP, México. Maestro en Edafología, Colegio de Posgraduados (COLPOS), México. Doctor en Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Nuevo León, México. Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, UASLP, México.

Juan Rogelio Aguirre Rivera. Ingeniero Agrónomo, Escuela Nacional de Agricultura, México. M.Sc. en Ecología, New México State University, EE. UU. Doctor en Agronomía, Universidad de Córdoba, España. Profesor-Investigador, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, UASLP, México.

José Luis Flores Flores. Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma de Chapingo, México. Maestro en Edafología y Doctor en Ciencias en Botánica, COLPOS, México. Profesor-Investigador, Instituto de Investigación de Zonas UASLP, México.

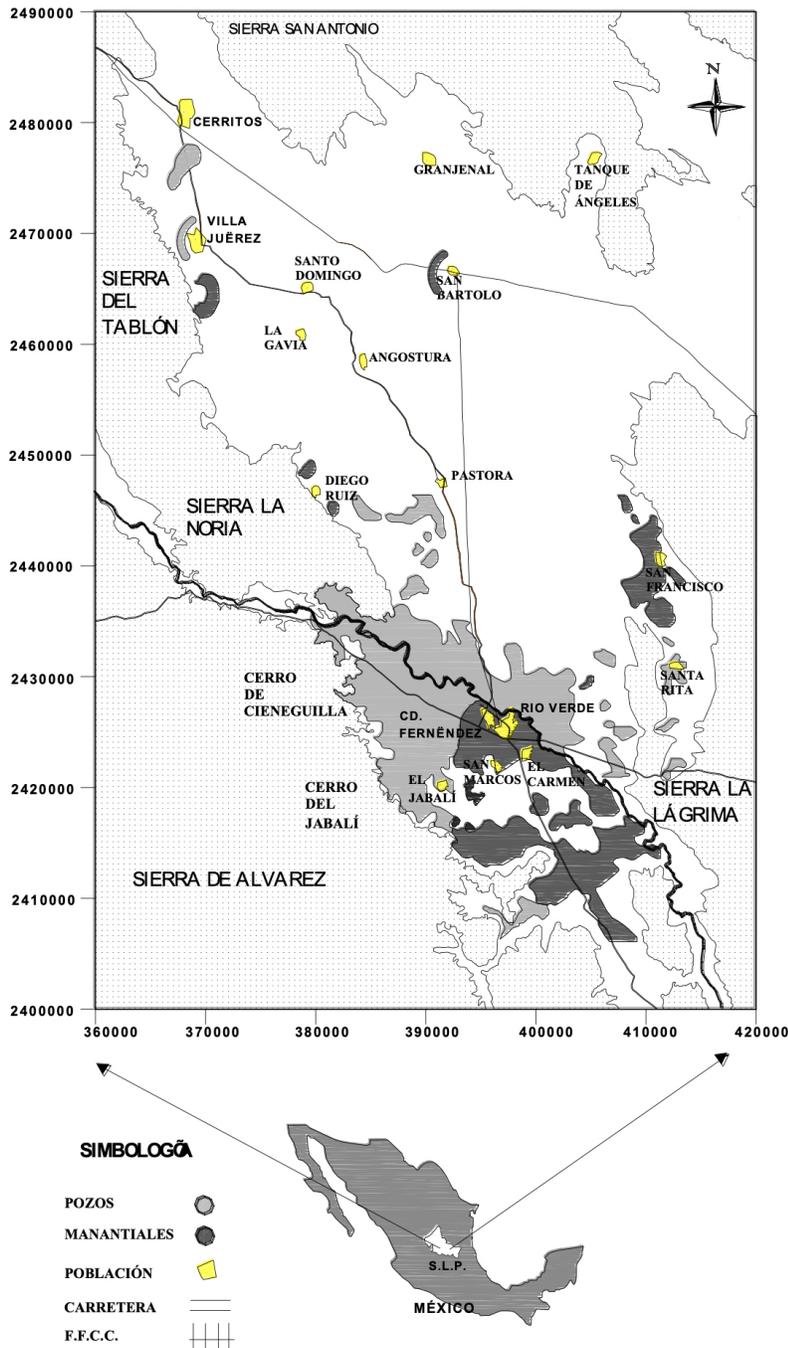


Figura 1. Valle de Rioverde, San Luis Potosí, México y sus áreas irrigadas. Fuente: Adaptado de Charcas *et al.* (2002).

niveles de bombeo, ii) reducción del caudal de la mayoría de los manantiales y desaparición de algunos, iii) disminución del caudal del río Verde, iv) agrietamiento y hundimientos en las edificaciones y viviendas. Estos efectos, son más intensos en la fracción sur del valle de Rioverde, por lo que se prevé que en esta área se presente un mayor abatimiento y una disminución de las aguas de mejor calidad en el acuífero

superficial y, se requiera aprovechar las aguas de menor calidad del acuífero profundo. Este escenario conduciría a una insuficiencia de agua de buena calidad para sustentar los actuales sistemas agrícolas, así como para abastecer la demanda del área conurbana, en crecimiento.

Este trabajo se dividió en dos partes. En la primera se describe el descubrimiento de las zonas de descarga y recarga de los acuíferos o sistemas de

flujo. En la segunda se describe el aprovechamiento de éstos y alguno de sus efectos ambientales en el valle de Rioverde.

Materiales y Métodos

Para el presente trabajo, se estableció la metodología siguiente. i) Recopilación y análisis de los estudios que tratan sobre la geología, hidrología, geohidrología y calidad de las aguas para uso agrícola y doméstico del valle de Rioverde, S.L.P., para lo cual se consultaron las bibliotecas y archivos siguientes: Casa de la Cultura de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Comisión Nacional del Agua y Archivo histórico del Gobierno del Estado de San Luis Potosí. La información se ordenó cronológicamente en tres periodos, antes de 1909, de 1909 a 1950 y de 1950 a 2006; las aportaciones de los estudios de cada periodo se sintetizaron con base en las características más relevantes de los acuíferos superficial y profundo, así como de los manantiales en el valle, con el fin de observar las zonas de recarga y descarga de los acuíferos superficial y profundo, estableciendo el funcionamiento de los sistemas de flujo. ii) Recopilación y análisis de estudios y censos de carácter agrícola y demográfico, e informes de los sistemas de abastecimiento de agua para la población urbana y rural del valle de Rioverde, S.L.P., consultándose las bibliotecas y archivos: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Casa de la Cultura de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Comisión Nacional del Agua y Archivo histórico del Gobierno del Estado de San Luis Potosí. La información se ordenó cronológicamente, geográficamente y se sintetizó en cuatro periodos de 20 años.

Resultados

Evolución del conocimiento del agua subterránea

Antes de 1909

En el año de 1888 el aprovechamiento del acuífero Rioverde se realizó mediante la excavación de pozos a cielo abierto para el abasto doméstico y para abrevaderos. En el lapso de 1888 a 1909, al construirse la vía del Ferrocarril Central Mexicano, tramo Tampico-Aguascalientes y el ramal San Bartolo-Rioverde, se perforaron pozos profundos en cada una de las estaciones localizadas en el valle de Rioverde. Las aguas subterráneas alumbradas resultaron ser ascendentes, sobre todo en las estaciones

Tablas, San Bartolo y Cerritos. El agua de dichos pozos se destinó al abastecimiento de las locomotoras de vapor, al mantenimiento de la estación y al uso doméstico de los empleados (Gálvez *et al.*, 1941; Ordóñez 1996).

Periodo 1909 a 1950

En 1909, se inició la exploración geohidrológica del valle de Rioverde, para localizar aguas artesianas potables para abastecer a las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández, asimismo para transformar en regadíos los terrenos localizados en el valle de Rioverde. Los resultados de dicho estudio arrojaron lo siguiente: i) *acuifero profundo con aguas artesianas* que probablemente se localizaban al oeste del valle de Rioverde, en el área comprendida entre las sierras de San Diego y La Noria y las localidades de San Diego y Diego Ruiz. La profundidad a la que deberían hacerse las perforaciones sería alrededor de 300m; ii) *aguas freáticas potables*, localizadas en el abanico aluvial Callejones (actualmente La Congregación El Refugio), en terrenos de las haciendas San Diego y El Jabalí. La profundidad de la capa freática se encontraba entre 3,4 y 6,5m; iii) *manantiales*, se ubicaban en todo el valle de Rioverde. Según su importancia y caudal, se distinguieron dos tipos: *caudalosos*, Ojo de Agua de Solano, Media Luna y Los Anteojitos, ubicados al suroeste del valle de Rioverde, que presentaban características similares en cuanto a temperatura y composición química, lo cual indicaba un origen profundo; *menos caudalosos*, Puenteitos, Arroyo Hondo, Las Higueras, San Antonio y Ojo de Agua de Ciudad Fernández, en la margen derecha del río Verde. En este estudio se realizaron los primeros análisis físico-químicos de las aguas de los manantiales Media Luna, Ojo de Agua de Solano, Arroyo Hondo, Las Higueras y Ojo de Agua de Ciudad Fernández. Así mismo, se analizaron las aguas de algunos pozos a cielo abierto, tales como Noria Municipal y San Balandrán. Según dichos análisis, todas las aguas de los manantiales resultaron impotables, mientras que las de las norias fueron potables. Cabe señalar que en este estudio se distinguen dos acuíferos en el valle, el Superficial y el Profundo. En la Figura 2 se muestra la localización de las aguas brotantes y freáticas y de manantiales en el valle de Rioverde San Luis Potosí (Paredes, 1909).

En 1923, se realizó la primera investigación hidrológica para localizar aguas artesianas y aprovecharlas mediante avenamientos o pozos. Según esta investigación, en una porción del

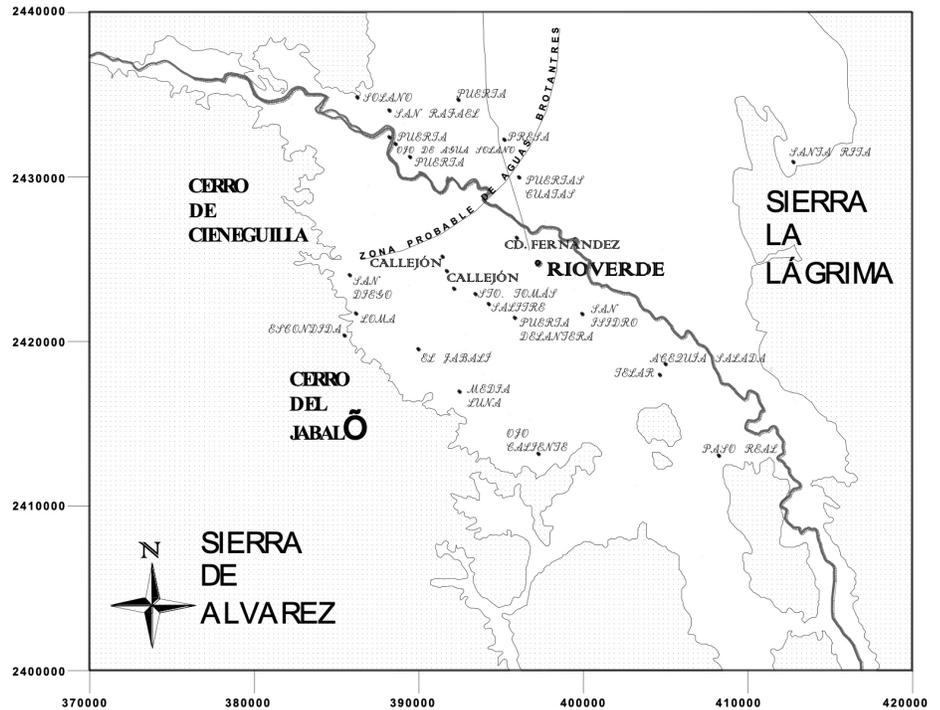


Figura 2. Zona probable de aguas brotantes del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México. Fuente: Adaptado de Paredes (1909).

municipio de Rioverde, la escorrentía superficial era abundante y sin posibilidad de almacenarla mediante presas. El agua subterránea también era abundante y con baja concentración de sales, lo cual permite aprovecharla en el abastecimiento urbano y en la transformación de la superficie de secano en riego. Se afora el manantial de La Media Luna (por los Ingenieros Don Sebastián Reyes y Don Adolfo Barreiro en 1899) y se obtuvo un caudal de $5047L \cdot s^{-1}$. Asimismo, El río Verde, se constituye como el dren principal de los escurrimientos superficiales de las zonas norte y sur, así como de los excedentes de los manantiales Media Luna y Los Anteojitos. Cabe mencionar que la corriente del río era perenne a partir de los excedentes del manantial Ojo de Agua de Solano (Obregón, 1923).

En 1937, se realizó el primer diagnóstico sobre las condiciones agrícolas e hidrológicas del valle de Rioverde, con el propósito de establecer las bases para el desarrollo agrícola en la región. Los resultados relacionados con la hidrología subterránea y superficial, fueron los siguientes: *Manantiales*: i) *Media Luna*, presentaba un caudal de $7812L \cdot s^{-1}$, con el cual se regaba una superficie superior a las 3085ha, que incluía los regadíos de Rioverde y Ciudad Fernández, y de los ejidos El Refugio, El Jabalí y El Capulín;

ii) *Ojo de Agua*, se regaba una superficie de 175ha de los ejidos La Reforma y Adjuntas. Los remanentes del regadío se vertían al río Verde, y al igual que en el periodo anterior el cauce del río Verde era permanente a partir de este manantial; iii) *El Nacimiento*, su caudal se concentraba en la presa de San Diego; asimismo, la escorrentía subsuperficial fluía hacia el abanico superficial de Callejones, donde alumbraban en pozos a cielo abierto; iv) *Los Peroles*, con un caudal de $500L \cdot s^{-1}$ regaba 400ha y Los Peroles con $422 \cdot s^{-1}$ regaba 350ha. Existían otros manantiales ubicados en las haciendas de La Angostura y La Boquilla. La calidad química de las aguas de estos manantiales se caracterizaba por su alto contenido de sulfato de calcio y carbonato de calcio, lo cual las hacía impotables, pero apropiadas para el riego (Acosta, 1934).

Las aguas superficiales se almacenaban en dos presas la primera San Diego, con capacidad para 2 millones de m^3 y un regadío de 450ha; la segunda El Jabalí, con capacidad para 1,5 millones de m^3 y un regadío de 200ha (Acosta, 1934).

Periodo 1950 a 2005

En el lapso de 1961 a 1984, se realizó el primer estudio

hidroquímico de las aguas superficiales y subterráneas de los municipios de Rioverde y Ciudad Fernández. El objetivo fue caracterizar las aguas de los aprovechamientos con base en su calidad química, en donde se pudieran obtener índices de potabilidad, tales como sólidos disueltos totales (SDT), dureza y grupo geoquímico. Con base en los índices anteriores, las aguas se ubicaban geográficamente de la manera siguiente: i) Zona norte,

predominan las aguas impotables con valores de SDT que varían de 1260 a 4500mg·L⁻¹, dureza de 1825 a 7450mg·L⁻¹, y grupo sulfatada cálcica; e impropias para el consumo humano. ii) Zona sur, predominan las aguas potables con valores de SDT que varían de 150 a 1020mg·L⁻¹, dureza de 90 a 1250mg·L⁻¹, predomina el grupo bicarbonatada cálcica y en menor proporción sulfatada cálcica; y adecuadas para el consumo urbano (Villalobos y

Díaz de León, 1985). La distribución geográfica de las aguas según su potabilidad, se presenta en la Figura 3.

En 1972 se realizó el segundo estudio geohidrológico en el valle de Rioverde. El propósito era definir el área de recarga de las aguas subterráneas, las fronteras laterales e inferiores de los acuíferos, la hidrometría de las aguas freáticas y profundas y el funcionamiento de los acuíferos. Se obtuvieron los siguientes resultados: Área de recarga, se identificaron dos superficies de acuerdo a la calidad geoquímica de las aguas: i) *Regional*, correspondiente a la Sierra de Álvarez a elevaciones de 2500m, en donde la precipitación se infiltra y circula en materiales calizos permeables y fracturados así como en rocas ígneas fracturadas; ii) *Local*, la cual corresponde a las sierras bajas de El Jabalí, Cieneguilla, San Diego y El Tablón a elevaciones menores a los 1500msnm, donde la precipitación se infiltra y circula en materiales granulares y descarga en pozos profundos y a cielo abierto. *Fronteras de los acuíferos*, los materiales granulares están delimitados lateral y basalmente por rocas calizas de las formaciones El Doctor y Guaxcamá, y rocas volcánicas (riolitas) del terciario. El acuífero profundo está determinado por las formaciones anteriores y por las de Cárdenas y Tamasopo. *Hidrometría*, el agua que fluía y circulaba por las cavernas de las formaciones calizas descargaba a través de cinco grupos de manantiales, con los caudales siguientes: a) Ojo de Agua de Solano (0,100m³·s⁻¹), Media Luna (4m³·s⁻¹) y Anteojitos (0,250m³·s⁻¹); b) La Virgen (0,112m³·s⁻¹), El Álamo (0,065m³·s⁻¹), Charco Azul (0,189m³·s⁻¹), Charco Sentado (0,061m³·s⁻¹), Agua Sonadora (0,598m³·s⁻¹), La Rosa (0,051m³·s⁻¹), Carrizalito (0,068m³·s⁻¹) y Palma Larga (1,197m³·s⁻¹); c) Los Peroles, Las Sabanas, Poza Azul y el Sabinito (sin aforo); d) San Bartolo (0,020m³·s⁻¹), La Lagunita, Santa Rosa, Mojarras y El Baño (sin aforo); y e) Puerta del Río (1m³·s⁻¹), Guaxcamá y Carrizales (sin aforo). Las aguas freáticas descargaban en el acuífero superficial mediante pozos a cielo abierto y profundos en dos zonas: *Norte*: el volumen de extracción se estimaba en 6 millones de m³·año⁻¹, los niveles freáticos se encontraban a profundidades de 5 a 30m y la dirección del flujo era de noroeste a sureste y de noreste a suroeste con convergencia en el río Verde. *Sur*: el volumen de extracción anual se estimaba en 8 millones de m³, los niveles freáticos en el borde del valle presentaban una profundidad de 3m, mientras que en la porción central llegaban hasta 10m;

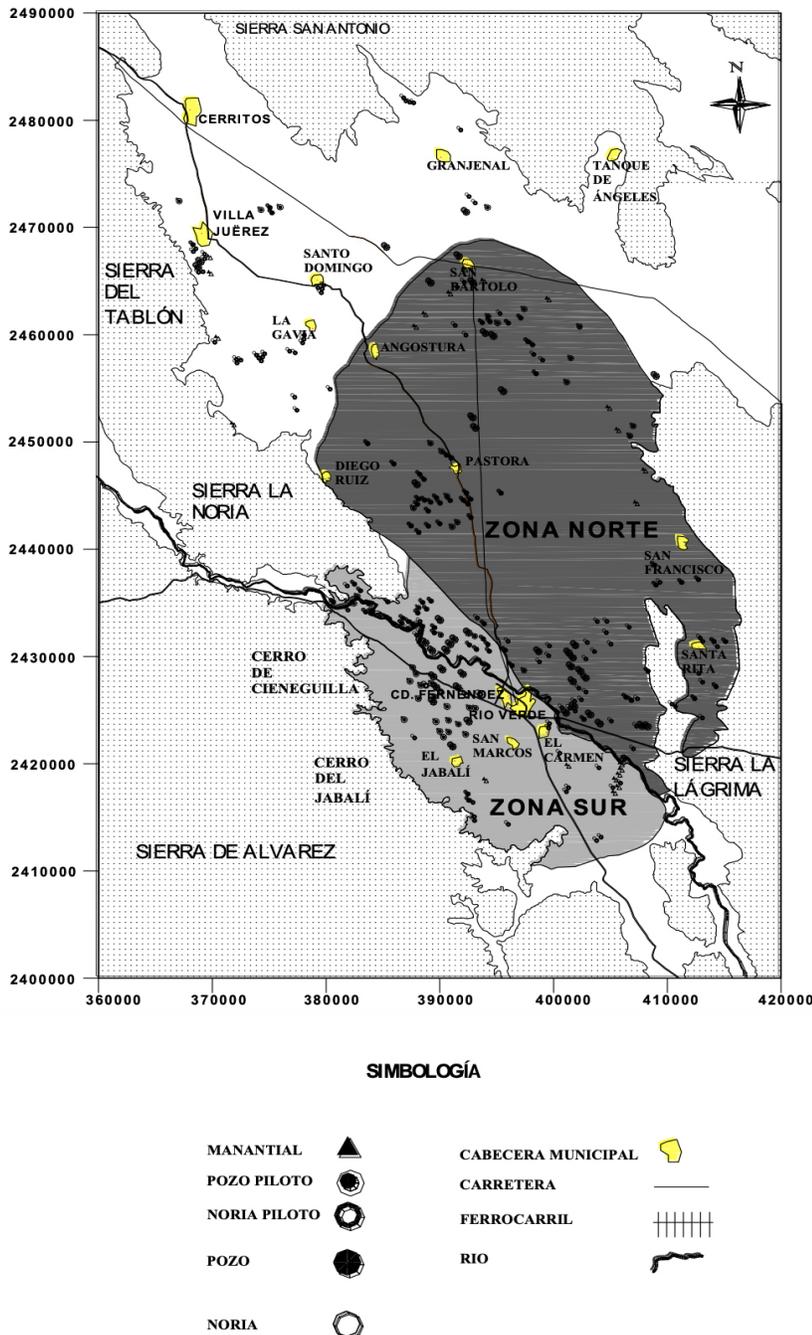


Figura 3. Distribución geográfica de las aguas subterráneas según su potabilidad, en los municipios de Rioverde, San Luis Potosí. Fuente: Adaptado de Villalobos y Díaz de León (1985).

las direcciones del flujo eran de oeste a este y de suroeste a noreste con convergencia en el río Verde (HIDROTEC, 1972; SARH, 1979).

En 1979, se realizó el tercer estudio geohidrológico en la porción sur del valle de Rioverde. El objetivo fue conocer la dinámica de las aguas de los ocho manantiales ubicados en la margen derecha y su relación con los nacimientos Media Luna y Los Anteojitos; con el propósito de reunir los caudales de los ocho manantiales y los remanentes de La Media Luna y Los Anteojitos para utilizarlos en la ampliación de los regadíos del sur y sureste del valle de Rioverde, así como la transformación en regadío del área de secano del valle de San Ciro de Acosta. Los resultados arrojaron lo siguiente: *Aforo*: los caudales de los ocho manantiales eran: La Virgen ($0,112\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), El Álamo ($0,065\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), Charco Azul ($0,189\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), Charco Sentado ($0,061\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), Agua Sonadora ($0,598\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), La Rosa ($0,051\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), Carrizalito ($0,068\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) y Palma Larga ($1,197\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) mientras que la Media Luna ($4,7\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) y Los Anteojitos ($0,15\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$). *Funcionamiento del acuífero*: los ocho manantiales, Media Luna y Los Anteojitos compartían las mismas áreas de recarga, circulaban por las mismas formaciones calizas e ígneas y posiblemente estarían interconectados, asimismo de acuerdo a los análisis isotópicos, las edades de las aguas de los nacimientos variaban de 20 a 30 años (SARH, 1979).

En 1982, se realizó el cuarto estudio geohidrológico en el valle de Rioverde para definir la extracción y funcionamiento del acuífero superficial. El propósito del trabajo fue complementar los estudios anteriores para fundamentar la ampliación de los regadíos de las distintas áreas de bombeo de pozos. Los resultados indicaban lo siguiente: *Hidrometría: Zona norte*, los niveles freáticos en el borde del valle eran de 4m a excepción del área al oeste con 30m, mientras que en la porción central de 5m; la dirección del flujo se unifica de noroeste a sureste y la extracción asciende a 16,10 millones de $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$. *Zona sur*, los niveles freáticos en el borde del valle eran de 6m, mientras que en la porción central de 12m; las dos direcciones de flujo se unifican en una nueva de suroeste a noreste y la extracción se incrementa a 16;1 millones de $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$; asimismo se inició el monitoreo hidrométrico del acuífero con aproximadamente 80 pozos (a cielo abierto y profundos) pilotos (Proyesco, 1980; Montañez, 1992).

En 1999 se realizó el quinto estudio geohidrológico en el valle de Rioverde, el objetivo fue reinterpretar la información previa sobre la geología e hidrogeología del valle de Rioverde, así como la obtención de nuevos datos que

incluían nuevos elementos químicos (Ba, Sr, Ni, Cr, Li, B, y F). Los resultados obtenidos indicaron que la Clasificación de muestras de aguas de aprovechamientos, con estadística multivariable (análisis cluster) identificaron cuatro grupos diferentes: i) *Pozos de El Refugio*, para uso doméstico y agrícola, las aguas pertenecían al grupo geoquímico bicarbonatadas cálcicas y a la clase C2S1; ii) *Pozos de El Refugio*, uso doméstico y agrícola, correspondientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y a la clase C3S1; iii) *Manantiales cársticos*, uso agrícola y recreativo, pertenecientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y clase C3S1, con altas temperaturas y con exceso de minerales; y iv) *Pozos de Pastora*, para uso agrícola, pertenecientes al grupo geoquímico sulfatadas cálcicas y clase C4S1. Asimismo, se demuestra la relación que existe entre los acuíferos superficial y profundo con la calidad de las aguas (Planner, 1999).

En 2002, se realizó un estudio de recopilación y clasificación de los datos de las muestras analizadas en los laboratorios del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas y del Distrito de Desarrollo Rural 130, de pozos y manantiales del valle de Rioverde. El objetivo fue caracterizar e interpretar la calidad química de las aguas de pozos y manantiales, de tal manera que se pudieran definir sus posibilidades de uso agrícola. Los resultados indicaron: i) *Zona norte*, las aguas de los pozos y manantiales corresponden a las clases C4S1 y C5S1. Estas aguas aplicadas en suelos someros, con deficiente drenaje y alto contenido de sales, permiten obtener bajos rendimientos en la mayoría de los cultivos. ii) *Zona sur*, las aguas de los pozos y manantiales pertenecen a las clases C1S1, C2S1 y C3S1. Su uso en suelos profundos con buen drenaje y bajo contenido de sales producen una gran diversidad de cultivos y obtener altos rendimientos. Asimismo, en la región de Rioverde la calidad química del agua para riego se puede establecer sólo con la determinación de su conductividad eléctrica (CE) y su potencial hidrógeno (pH). La distribución geográfica de las clases de agua de pozos y manantiales se muestra en la Figura 4 (Charcas *et al.*, 2002).

En 2003 se realizó una segunda evaluación del aprovechamiento del agua subterránea y su impacto en las áreas agrícolas en el valle de Rioverde. Los resultados indicaron: i) *Zona norte*, el agua de peor calidad (C4), se utilizaba en el 31% de la superficie de riego por bombeo en cultivos forrajeros; ii) *Zona sur*, las clases de agua de mejor calidad (C2 y C3) eran aprovechadas para el regadío del 68% de la superficie dedicada a hortalizas

y cítricos; el 1% de la superficie era regada con agua de excelente calidad (C1) en hortalizas y cítricos. El estudio propone diversas acciones para hacer un uso más eficiente del agua, tales como la instalación de medidores en los pozos, programas de capacitación y apoyo para el mejoramiento de la productividad, conservación del agua y la construcción de sistemas de conducción y aplicación más eficientes (Ballín, 2003).

En 2005 se realizó un estudio geohidrológico e hidrométrico del acuífero superficial Rioverde-Ciudad Fernández (Congregación El Refugio). El propósito fue definir el funcionamiento de dicho acuífero y establecer las áreas de recarga locales para planear obras de recarga artificial. Los resultados obtenidos arrojan: i) *Hidrometría*, el nivel freático en el borde del valle era de 6,35m mientras que en la porción central de 37,7m, la dirección del flujo era de suroeste a noreste y la extracción total ascendió a 74 millones de $\text{m}^3\cdot\text{año}^{-1}$; ii) *Zonas de recarga*, situadas en el pie de monte de las sierras de Cieneguilla, San Diego y El Jabalí, en elevaciones menores a los 1450msnm, *obras de recarga*, a corto plazo se propone una presa de gaviones y dos de mampostería en el arroyo El Nacimiento. A mediano plazo, se proyectan dos pozos de recarga y extracción en los arroyos La Loma y Grande, así como algunas presas de gaviones. A largo plazo se proyectan la calibración de un modelo de simulación geohidrológica y la construcción de pozos de recarga para analizar el comportamiento del acuífero. En cada etapa se consideran estudios de evaluación del impacto de las obras por realizar (Candelaria *et al.*, 2005).

Disponibilidad del Agua Subterránea

El INEGI (2002) realiza un Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí, que basado en los estudios de Hidrotec de 1972 y Proyesco de 1980. Este estudio determinó que para el acuífero de Rioverde, una recarga de 66,2 millones de m^3 y una descarga de 74 millones de m^3 , cuantificándose un déficit en la explotación de 7,8 millones de m^3 por año.

En el mismo año, la CNA (2002) determina para el acuífero superficial y profundo una disponibilidad media anual de 4,18 millones de m^3 , resultado de una recarga total de 84,5 millones de m^3 producto de todos los volúmenes de entrada, menos la descarga natural comprometida resultado de los volúmenes procedentes de manantiales y del caudal base del río Verde, descarga natural comprometida para el distrito de riego No. 123 con un valor de 1,27 millones de m^3

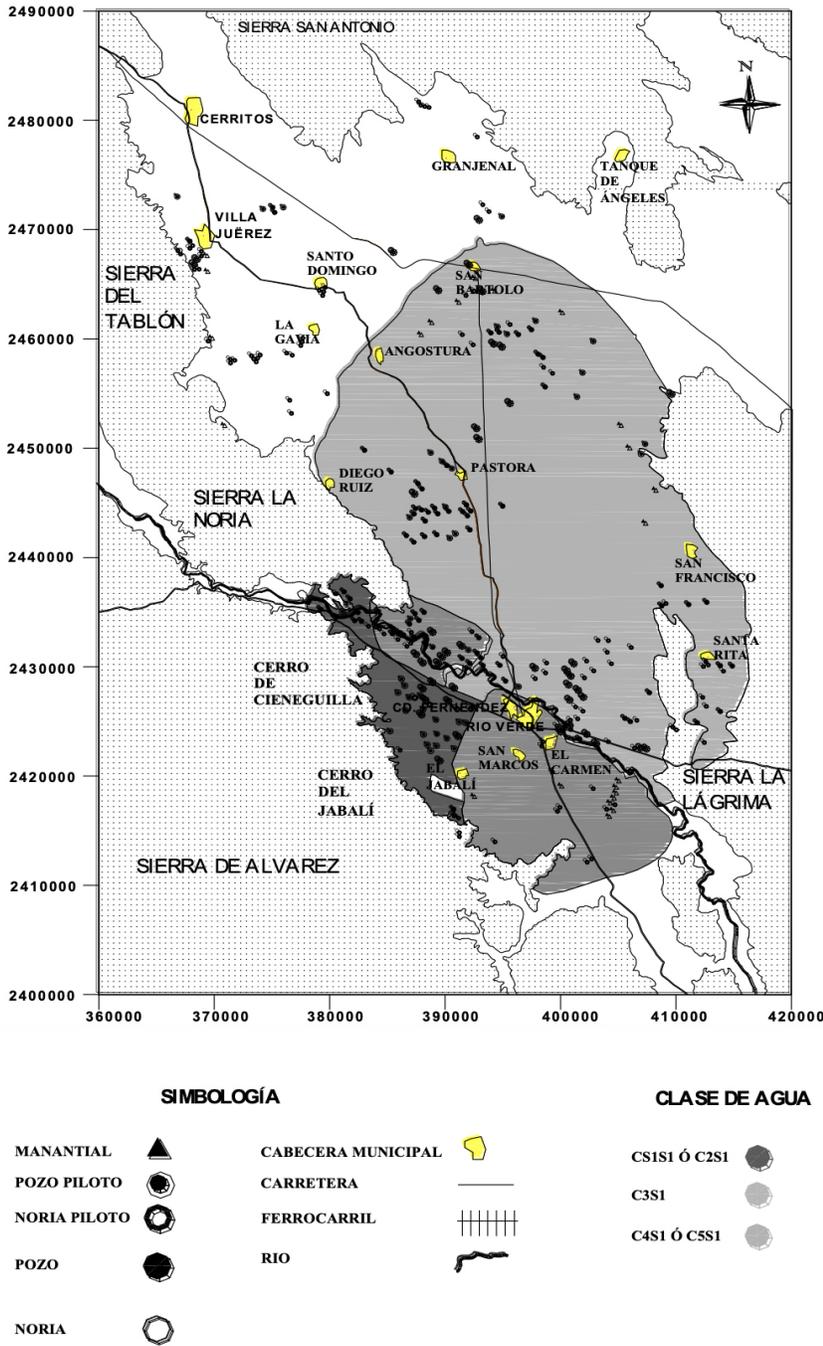


Figura 4. Distribución de las clases de agua de pozos y manantiales del valle de Rioverde, San Luis Potosí, México. Fuente: Adaptado de Charcas *et al.* (2002).

y del volumen estimado por el REPDA (Registro Público de Derechos de Agua) al 30 de abril de 2002 con un valor de 79,04 millones de m³.

En 2009, la recarga y la descarga natural son similares, el volumen de extracción es de 74,4 millones de m³, y presenta un déficit de 0,713 millones de m³ debido al incremento en la extracción de 83,94 millones de m³ (CONAGUA, 2009).

En 2015, el acuífero presenta una disponibilidad de 78,35 millones de m³, un volumen de extracción anual de 86,04 millones de m³, con una recarga de 415,8 millones de m³; administrativamente, pasa de un acuífero en déficit a uno con posibilidades de extracción (CONAGUA, 2015).

En 2020, considera un volumen de extracción de 134,82 millones

de m³, con una recarga y descarga natural similares al periodo anterior con un volumen disponible de 29.58 millones de m³ (CONAGUA, 2020).

Aprovechamiento del agua subterránea

El uso del agua subterránea en el valle de Rioverde geográficamente se puede dividir en dos zonas:

Zona norte: En esta zona en el periodo hasta antes de 1950, las aguas freáticas se extraían mediante pozos para uso doméstico, y los manantiales se utilizaban para el suministro de regadíos: i) *Acuífero superficial*, con perforaciones que abastecían a poblaciones, como El Sabino, La Muralla, San Francisco, San Bartolo, Angostura, Progreso y Pastora. ii) *Acuífero profundo*, con pozos que suministraban a las estaciones del Ferrocarril Central Mexicano (San Bartolo, Tablas, El Cirio y Pastora), iii) *Manantiales*, San Bartolo y Los Peroles regaban una superficie de 400 y 350ha, respectivamente. La producción de cosechas consistía en maíz, caña de azúcar y algodón (Anónimo, 1906; Acosta, 1934; Gálvez *et al.*, 1941; Ordóñez, 1996).

En 1970 el uso del agua subterránea se realizaba de la siguiente forma: i) *Acuífero superficial*, se incrementa a 90 pozos (81% a cielo abierto) con profundidad máxima de 102m. La extracción del agua se realizaba con motores de combustión interna de 1,1 a 56kW y bombas centrífugas; los caudales eran de 2 a 70L·s⁻¹; ii) *Manantiales, en dos grupos*: A) Los Peroles, Las Sabanas, Poza Azul y El Sabino, con un caudal total estimado de alrededor de 645L·s⁻¹, con un regadío de 500ha. B) El Baño, Santa Rosa, Mojarras, La Lagunita y San Bartolo, con un caudal de 200L·s⁻¹, para abastecer tres pequeños regadíos. El área agrícola irrigada por pozos y manantiales en total era de 2666ha y se sembraba principalmente maíz, frijol y algodón (SRH, 1966; DGE, 1975).

En 1990 se intensifica la utilización del agua subterránea mediante pozos: i) *Acuífero superficial*, entre 90 y 129 pozos perforados a una profundidad máxima de 256m, la extracción se realizaba con motores de combustión interna y eléctricos, con caudales de 25 a 81L·s⁻¹. El área agrícola irrigada se incrementó a 2956ha, se sembraba principalmente maíz, sorgo y alfalfa (INEGI, 1994; Información proporcionada por el Distrito de Riego 130 y la Comisión Nacional del Agua).

Zona sur. Antes de 1950 las condiciones generales del aprovechamiento de las aguas freáticas y de los manantiales tenían las características generales siguientes: i) *Acuífero superficial*,

existían pozos a cielo abierto que abastecían a las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández, así como a pequeñas localidades, sus caudales eran alrededor de $15\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; ii) *Manantiales*, se señalan cinco manantiales, con los caudales y regadíos siguientes: Ojo de Agua de Solano con $200\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ y 175ha . Media Luna: A) *Rioverde*, $1846\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; B) *Ciudad Fernández*, $903\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; C) Ejidos y Pequeñas Propiedades del sur y sureste, $647,5\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; D) El Jabalí, $1553\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. Los Antojitos, $200\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. Palma Larga, $1200\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ (Paredes, 1909; Acosta, 1934; DGE, 1937; Gálvez *et al.*, 1941; DGE, 1957; SARH, 1979).

En 1970 el agua freática se extraía mediante pozos para el abastecimiento de las ciudades y pequeñas localidades, así como para regadíos ubicados en la margen derecha del río Verde y al suroeste del valle de Rioverde. Las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández se suministraban mediante dos pozos perforados en el acuífero superficial con un caudal de $32\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. La población urbana y rural abastecida era de 32000 habitantes. Los regadíos se abastecían con 115 pozos (77% a cielo abierto), con profundidad máxima de 36m, la extracción del agua se realizaba con motores de combustión interna de 2,2 a $20,9\text{kW}$ y bombas centrífugas, con un caudal de 7 a $60\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, el área agrícola irrigada era de 2300ha, y la producción de cosechas consistía en maíz para grano, chile y jitomate en un solo ciclo. El área tradicional era irrigada por manantiales y estaba conformada por los regadíos: A) Rioverde y Ciudad Fernández, los cuales eran abastecidos por las acequias Rioverde y Villana; B) El Capulín, con las acequias Capulín y Palos; C) Ejidos y pequeñas propiedades del sur y sureste, abastecidos con la acequia San José (SRH, 1966; DGE, 1975).

En 1990 se incrementó el número de pozos para uso urbano y agrícola, y los regadíos tradicionales conformaron el Distrito de Riego 049. Las ciudades de Rioverde y Ciudad Fernández se abastecían de ocho pozos perforados en el acuífero superficial, con un caudal total de $156\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. La población urbana y rural abastecida era de 58000 habitantes. Los regadíos ubicados en la margen derecha del río Verde y al suroeste del valle de Rioverde, (Zona agrícola de la comunidad del Refugio) eran proveídos por 179 pozos (78% profundos), con profundidad máxima de 75m, en donde la extracción se realizaba con motores de combustión interna y eléctricos de 4,5 a $63,4\text{kW}$, bombas de turbina, con un caudal de 3 a $36\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. La superficie irrigada se incrementó a 3850ha; la producción de cosechas se diversificó y se realizó en dos ciclos: invierno-primavera, maíz para elote,

chile, jitomate y tomate; verano-otoño, maíz para elote. En ambos ciclos, las variedades eran mejoradas con mayor requerimiento de agua. Así mismo, se cultivaban naranja valenciana, mandarina, alfalfa y sorgo. Se amplió la red eléctrica, lo cual trajo como resultado una mayor eficiencia en los equipos de bombeo que incrementó en gran medida la extracción en el acuífero. Se conforma el Distrito de Riego 049 con una superficie atendida, 4210ha, superficie dominada, 7583ha y superficie decretada, 14000ha; la cual era irrigada por los siguientes manantiales i) *Media Luna*, con un caudal promedio de $4691\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, distribuido en cuatro canales: Principal Media Luna, $2445\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; Capulín, $457\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; Potrero de Palos, $262\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; San José, $872\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; y Dren de Descarga, $655\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. Al mismo tiempo, se construyó una red de drenes, cinco en el área tradicional, y tres en la ampliada. Con esta unidad se intentaba incorporar 1416ha localizadas al norte de la ciudad de Rioverde; ii) *Acequia Salada*, se construyó una estación de bombeo y el canal San Ciro, el cual sería alimentado con los remanentes del regadío de Rioverde y Ciudad Fernández y con las aguas de los ocho manantiales de la margen derecha del río Verde. Con esta unidad se intentaba transformar 2095ha de secano a riego. Por problemas de derechos de aguas de los usuarios aguas abajo del área tradicional de riego, así como por insuficiencia de la misma, el nuevo proyecto de riego quedó parcialmente abandonado en ambas unidades (SARH, 1979; Montañez, 1992; información proporcionada por el Distrito de Riego 130 y la Comisión Nacional del Agua).

El establecimiento del Distrito de Riego 049 trajo como consecuencia: i) desecación del humedal y ampliación del área agrícola, ii) desaparición de los cuerpos de agua permanentes del humedal: laguna Tlacotes y Charco La Pala, iii) desaparición de los manantiales Palma Larga, El Carrizalito y La Rosa, así como, la reducción del caudal y la posibilidad de derivación de Los Antojitos, y iv) se incrementó la profundidad del nivel freático en el área de bombeo de El Refugio.

En 2006 se intensifica la extracción del agua freática, en el suroeste del valle de Rioverde se inicia el aprovechamiento del acuífero profundo, y disminuyeron los caudales de los manantiales de la margen derecha del río Verde. El número de pozos se incrementa de 179 a 742 pozos perforados en el acuífero superficial, con motores eléctricos de 3,7 a $93,2\text{kW}$, bombas de turbina y sumergibles y caudal de 3 a $100\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. Se inicia el aprovechamiento del acuífero profundo

con pozos perforados con caudales de alrededor de $100\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$. De los pozos profundos, 49 están inactivos, 68 son urbanos y 617 agrícolas para una superficie de 4095ha con cultivos anuales en invierno-primavera con chile, jitomate, tomate y calabacita y en verano-otoño maíz para elote, con predominio de variedades mejoradas; frutales (naranja y mandarina) y forrajes (alfalfa y sorgo); la aplicación del agua y nutrientes es mediante riego por goteo a maíz y hortalizas, y microaspersión a frutales, y por gravedad a frutales y maíz en surcos y amelgas.

Los pozos para uso doméstico abastecen a una población urbana y rural de 68000 habitantes. Los *Manantiales*, Agua Sonadora, El Sabinito, Charco Sentado, Charco Azul, El Álamo y La Virgen redujeron drásticamente sus caudales (INEGI, 2002; Ballín, 2003; INEGI, 2006). Además, el humedal se transforma en regadío y en viviendas campestres. Los manantiales, principalmente la Media Luna, se usan con fines turísticos, generando contaminación del agua y el suelo y daños a la fauna y flora endémicas. En el ámbito administrativo, se conforma el Comité Técnico de Aguas Subterráneas de Rioverde, el cual realiza acciones de monitoreo de la calidad del agua, hidrometría del acuífero y regulación de las extracciones mediante medidores (SEGAM, 2002).

Discusión

El estudio de la geohidrología y el aprovechamiento del valle de Rioverde, pueden distinguirse tres etapas. La primera, por un incipiente aprovechamiento ante necesidades pequeñas, como el abastecimiento a poblaciones y abrevaderos, suministrados mediante manantiales y pozos a cielo abierto. Esta etapa, se distinguió por la búsqueda del agua subterránea, pues la construcción del Ferrocarril Central Mexicano hizo necesaria la realización de estudios que permitieran la perforación de pozos para el mantenimiento de las máquinas de vapor. El Instituto Geológico Minero, realizó estudios con el fin de encontrar aguas freáticas potables que tuvieran posibilidad de aprovecharse, encontrando abundancia de aguas freáticas descargadas en manantiales y en pozos a cielo abierto a poca profundidad. En una segunda etapa, se inicia el aprovechamiento del agua subterránea con fines agrícolas. A nivel federal, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y a nivel regional, el Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, se enfocaron en realizar un inventario de los aprovechamientos (pozos a cielo abierto, profundos y manantiales), así como de sus

características (tecnología, hidrometría, y calidad del agua). Esta etapa se caracteriza por la transformación de la tecnología de extracción, cambiando motores de combustión interna y bombas centrífugas hacia motores eléctricos y bombas de turbina. Esto repercutió en un incremento en la extracción del agua freática. En las áreas agrícolas los cultivos predominantes fueron el maíz para grano, chile y jitomate, posteriormente se incorporan nuevas áreas al regadío. Este incremento del área agrícola y la tecnología de extracción llevó a un desequilibrio en la recarga-extracción con consecuencias ambientales, como la pérdida de humedales y la desaparición y reducción de caudales de manantiales. Sin embargo, se constituyó una zona agrícola de gran desarrollo al sur del valle de Rioverde. La tercera etapa se caracterizó por la búsqueda de una mayor cantidad de agua, lo que llevó a la evaluación de los acuíferos por el reconocimiento de las áreas de recarga, las fronteras de los acuíferos, la descarga natural y artificial del agua subterránea. En las áreas agrícolas cambian los patrones de cultivo, incorporándose frutales como la naranja y la mandarina y los forrajes como la alfalfa, además de nuevas tecnologías de extracción como las bombas sumergibles, lo que permite una mayor extracción, acentuando el déficit. Debido al conocimiento de los acuíferos y de los aprovechamientos, se inicia la administración del agua subterránea con el propósito de revertir los efectos ocasionados por el intenso aprovechamiento, iniciando la tecnificación de los sistemas de riego, la implementación de medidores, y el control y manejo del agua por organismos no gubernamentales (COTAS). Sin embargo, los esfuerzos por las instituciones gubernamentales para reducir el déficit, son improductivos, debido a una mayor extracción.

Para disminuir estos efectos negativos, las instituciones gubernamentales se han enfocado fundamentalmente en acciones enfocadas a mejorar la infraestructura hidráulica, sin embargo, la reforestación, la conservación de la vegetación nativa, o el manejo de la escorrentía, son escasamente utilizadas.

Determinar la disponibilidad en el acuífero de Rioverde, partiendo del análisis de las condiciones de recarga y descarga de acuerdo con censos, resulta poco confiable, ya que muestran datos con recargas desde 66,2 millones de m³ en el año de 2002, hasta 415,8 millones de m³, en el año de 2015, generando gran confusión y variación en la disponibilidad. Por otro parte, las descargas de pozos y manantiales y los flujos

subterráneos, se estimaron con mediciones imprecisas, sin considerar los cambios en los patrones de precipitación espacial y temporal, los cuales están en constante cambio y movimiento y por tanto tienen poca confiabilidad.

En cuanto a las descargas mediante manantiales presentan poca o nula medición de sus caudales, mientras que los pozos presentan una cobertura de medición insuficiente (menor a un 80%) por lo que representan estimaciones con valores de baja precisión.

En cuanto a la conformación y delimitación de los acuíferos superficial y profundo, la delimitación actual de sus límites laterales y verticales se definieron convencionalmente para fines de evaluación y administración. Estos acuíferos administrativos son áreas imaginarias, que están fuera de sus límites naturales, geológicamente, e hidráulicamente.

Por lo tanto, es necesario que el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) cuente con un sistema eficiente para incorporar y procesar la información, que permita conocer la demanda y la disponibilidad en tiempo real y el número de concesiones y volumen concesionado sobre el agua subterránea, así como las descargas naturales mediante manantiales artificiales y pozos, así como su número.

La generación de modelos de flujo, que integre parámetros geológicos, hidrológicos, edáficos, de vegetación y geomorfológicos en conjunto con las áreas de recarga, extracción, (mediante pozos y manantiales) y la calidad química del agua, permitiría definir trayectorias de los flujos, estableciendo el funcionamiento del agua subterránea y distinguir en este sistema acuífero, el acuífero superficial y el acuífero profundo, asimismo permitirían identificar conos de abatimiento, con el fin de evitar mayores abatimiento y los posibles conflictos entre sus usuarios. Esto abriría la posibilidad de analizar, desarrollar e implementar estrategias de control y protección del agua subterránea.

Conclusiones

El propósito del artículo fue conocer profundamente el funcionamiento del acuífero de Rioverde, considerando los estudios cronológicos de la geohidrología, comprendiendo los sistemas de flujo y su aprovechamiento. Especialmente se identificaron las zonas de descarga, a través de pozos y manantiales y de recarga en las sierras circundantes del valle de Rioverde, de los acuíferos superficial y profundo.

El aprovechamiento del agua subterránea debería considerarse

como un componente del ciclo hidrológico, que permita la persistencia de las áreas agrícolas y de las poblaciones, así como el equilibrio ecológico de los sistemas dependientes de ésta agua como ríos, humedales, fauna y flora, con mínimos impactos negativos al ambiente.

REFERENCIAS

- Acosta R (1934) *El valle agrícola y agrario de Río Verde*. S.L.P. México. 44 pp.
- Anónimo (1906) San Luis Potosí The History of the State. Panamerican Magazine. México. 20 pp.
- Ballín JR (2003) *Caracterización y manejo del hidrosistema de la región agrícola de Rioverde*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. 160 pp.
- Campos FD (1993) Análisis agro-climático preliminar del estado de San Luis Potosí. *Agrociencia* 4: 19-43.
- Candelaria A, Martínez S, Silva S, Benavente J, González E, García B, Castillo D, Araiza J A, Cardona A, Padilla L, Aceves J, Ballín JR (2005) *Estudios prioritarios para la recarga del acuífero Ciudad Fernández*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 124 pp.
- Charcas H, Olivares E, Aguirre JR (2002) Agua de riego en la región de Rioverde, San Luis Potosí, México. *Ingeniería Hidráulica en México* 15: 37-56.
- CNA (2002) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Verde*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 25 pp.
- CONAGUA (2009) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Verde*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 28 pp.
- CONAGUA (2015) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Verde*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 33 pp.
- CONAGUA (2020) *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Verde*. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 36 pp.
- DGE (1937) *Primer Censo Agrícola-Ganadero 1930, Estado de San Luis Potosí*. Dirección General de Estadística. Secretaría de la Economía Nacional. México. 216 pp.
- DGE (1957) *Tercer Censo Agrícola Ganadero y Ejidal 1950, San Luis Potosí*. Dirección General de Estadística. Secretaría de Economía. México. 320 pp.
- DGE (1975) *V Censos Agrícola-Ganadero y Ejidal 1970, San Luis Potosí*. Dirección General de Estadística. Secretaría de Industria y Comercio. México. 300 pp.
- Gálvez V, Hernández A, Blázquez L (1941) *Estudios Hidrogeológicos Practicados en el Estado de San Luis Potosí México*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Universidad Nacional de México. México. 139 pp.
- García, E (2004) *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen*. Instituto de

- Geografía, Universidad Autónoma de México. México. 90 pp.
- HIDROTEC (1972) *Informe del estudio geohidrológico preliminar en la zona de Rioverde, S.L.P.* San Luis Potosí. Hidro tecnología Ledezma. S.A. de C.V., México. 181 pp.
- INEGI (2006) *Anuario Estadístico Del Estado De San Luis Potosí*. Tomo I. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 70 pp.
- INEGI (2002) *Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México. 124 pp.
- INEGI (1994) *Resultados definitivos. VII. Censo agrícola-ganadero*. Tomo I. Instituto General de Estadística, Geografía e Informática. México. 505 pp.
- Montañez A (1992) *Hidro geoquímica del municipio de Rioverde, San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. 91 pp.
- Obregón M (1923) *LA IRRIGACIÓN: Por medio de presas, canales, avenamientos y pozos artesianos*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Universidad Autónoma de México., México. 128 pp.
- Ordóñez E (1996) El valle de Cerritos, San Luis Potosí. En *VIDA y OBRA: Obra científica IV (1905-1931)*. El Colegio Nacional. México. 489 pp.
- Paredes T (1909) *Estudio hidrológico de la región de Rioverde y Arroyo Seco, en los estados de San Luis Potosí y Querétaro*. Instituto de Geología. Universidad Autónoma de México. México. 47 pp.
- Planner BF (1999) *Hydrogeological and hydro-chemical investigations in the Rioverde basin, México*. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Alemania. 246 pp.
- PROYESCO (1980) *Trabajos complementarios del estudio geohidrológico de la zona de Rioverde, S.L.P.* Tomo I. Proyectos, Estudios y Consultoría S.A. de C.V. México. 96 pp.
- SARH (1979) *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona de San Ciró, San Luis Potosí*. México. Secretaría de Agricultura y Recursos hidráulicos. México. spp.
- SEGAM (2000) *Plan de Ordenamiento Ecológico del Valle de Rioverde y Ciudad Fernández. San Luis Potosí, México*. Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental. 232 pp.
- SRH (1966) *Inventario de Aprovechamientos Superficiales y Subterráneos para Riego San Luis Potosí*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. 117 pp.
- Villalobos CI, Diaz de León E (1985) *Composición de Aguas en el Estado de San Luis Potosí Período 1961-1985*. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. 144 pp.

RECENT DEVELOPMENTS IN THE USE OF THE RIOVERDE AQUIFER, SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO

Francisco Aguilar Ortega, Hilario Charcas Salazar, Juan Rogelio Aguirre Rivera and José Luis Flores Flores

SUMMARY

The analysis of historical data of the knowledge of recharge, discharge and the resulting hydrological imbalance allows us to explain the formation of the Rioverde aquifer. This article organizes and synthesizes, based on geohydrological studies, agricultural and population censuses, the most relevant characteristics of the superficial and deep aquifers of the springs, as well as the use of groundwater, for agricultural purposes and for supplying the population, rural and

urban belonging to the Rioverde aquifer. The results show both an aquifer with an incipient use of abundant phreatic water and one with an intensive extraction with a use of phreatic and deep water. Likewise, great uncertainty is observed regarding its availability, since recharge values vary widely. During the extraction, the number of wells increases, which generates depletion and the disappearance and reduction of spring flows.

DESENVOLVIMENTO RECENTE NO APROVEITAMENTO DO AQUÍFERO RIOVERDE, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Francisco Aguilar Ortega, Hilario Charcas Salazar, Juan Rogelio Aguirre Rivera e José Luis Flores Flores

RESUMO

A análise de dados históricos sobre recarga, descarga e o desequilíbrio hidrológico resultante ajuda a explicar a configuração do aquífero Rioverde. Com base em estudos geohidrológicos, censos agrícolas e populacionais, este artigo organiza e resume as características mais relevantes dos aquíferos rasos e profundos dos mananciais, bem como o uso da água subterrânea para fins agrícolas e para o abastecimento da população rural e urbana pertencente ao aquífero Rioverde. Os

resultados mostram tanto um aquífero com uso incipiente de água subterrânea abundante quanto um aquífero com extração intensiva de água subterrânea e água subterrânea profunda. Também há grande incerteza sobre sua disponibilidade, pois os valores de recarga são altamente variáveis. Em termos de captação, o número de poços está aumentando, o que está levando ao esgotamento, ao desaparecimento e à redução dos fluxos das nascentes.