

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-05

Artículos

Tipificación de los acuíferos del campo Mina, Nuevo León, utilizando sistemas de información geográfica

Classification of aquifers in the Mina field, Nuevo Leon, using geographic information systems

Hipólito Villanueva-Hernández¹

Rodrigo Tovar-Cabañas²

Rocío Vargas-Castilleja³

¹Universidad Autónoma del Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, hipolito.villanuevah@uanl.mx

²Universidad Autónoma del Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, rodrigo.tovarc@uanl.mx

³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria, México, rocvargas@docentes.uat.edu.mx

Autor para correspondencia: Hipólito Villanueva-Hernández, hipolito.villanuevah@uanl.mx

Resumen

El objetivo de este estudio es explorar la disponibilidad del agua subterránea del acuífero número 1908, Campo Mina, estado de Nuevo León, México para la planificación agroindustrial de la subcuenca río Bravo-San Juan, utilizando datos derivados de sensores remotos y sistemas de información geográfica para la planificación agroindustrial de la subcuenca río Bravo-San Juan bajo contexto de cambio climático. Los datos de teledetección y sistemas de información geográfica se utilizaron para delimitar las zonas potenciales de agua subterránea en la sub-cuenca del río Bravo. Los mapas: topográfico, geológico,

hidrogeomorfológico, estructural, de disección del relieve, de pendientes y de agua subterránea, se procesaron utilizando datos de teledetección junto con otros mapas existentes. La disponibilidad de agua subterránea del acuífero se clasificó cualitativamente en diferentes clases (de muy buena a nula) en función de sus condiciones hidro-geomorfológicas. El mapa de disponibilidad del agua subterránea del campo Mina, se elaboró considerando los máximos y mínimos de precipitación así como la clasificación climática de Köppen pero modificada por García (2004) y ajustada para las condiciones del noreste de México. Las cuñas sedimentarias del aluvión cuaternario (acuífero libre), los piedemonte de caliza con lutita así como las colinas de caliza fueron delineadas con éxito para mostrar la potencialidad de agua subterránea de cada formación.

Palabras clave: agua subterránea, percepción remota, sistemas de información geográfica, municipio de Mina, GvSIG.

Abstract

This paper studies the availability of groundwater from the "Campo Mina" aquifer, located in the state of Nuevo Leon, Mexico for the agro-industrial planning of the Bravo-San Juan sub-basin. The methodology consists of compiling data derived from remote sensors and geographic information systems for the agroindustrial planning of the Rio Bravo-San Juan sub-basin under a climate change context. Remote sensing and GIS data were used to delineate potential groundwater zones. Several maps (such as: topographic map, geological, hydrogeomorphological, structural, relief dissection, slope map, groundwater) were processed using remote sensing data along with other existing maps. The availability of groundwater of the aquifer was classified qualitatively in different classes (*i.e.*, very good, good, regular, poor and zero) depending on their hydro-geomorphological conditions. The groundwater availability map of the Mina field, Nuevo León, was elaborated considering maximum and minimum precipitation as well as the climatic classification of Köppen modified by García (2004) and adjusted for the conditions of northeastern Mexico. The sedimentary wedges of the quaternary alluvium (free aquifer), shale limestone piedmont as well as limestone hills were successfully delineated to show groundwater potential for each formation.

Keywords: Groundwater, remote sensing, geographic information systems, municipality of Mina, GvSIG.

Recibido: 09/03/2017

Aceptado: 21/11/2018

Introducción

El agua subterránea es aquella que ocupa todos los espacios vacíos dentro de un estrato geológico (Kasenow, 2001: 27), es el agua que se encuentra debajo del nivel freático en suelos y formaciones geológicas (Arizabalo y Díaz, 1991). Las formaciones geológicas que contienen agua en la corteza terrestre actúan como vasos comunicantes o como depósitos para almacenar el agua. La presencia de agua subterránea en una formación geológica y las posibilidades de su explotación dependen principalmente de la porosidad de la formación. En presencia de fracturas interconectadas, grietas, juntas, cavidades de solución o zonas trituradas (por ejemplo, zonas de cizallamiento como el graben de Acambay en el estado de México), el agua de lluvia puede filtrarse fácilmente a través de ellas y sumarse al agua subterránea. Por lo que para estimar zonas potenciales de agua subterránea es necesario realizar estudios sobre el terreno.

Sin embargo, con el advenimiento de la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), el mapeo de zonas de potencial de agua subterránea en determinada unidad geológica se ha convertido en un procedimiento más preciso (Maidment, 2002). Las condiciones del agua subterránea varían significativamente en función de la pendiente, la profundidad, la erosión, la presencia de fracturas, la presencia de cuerpos de agua, canales o campos de irrigación, etcétera. Estos y otros factores como el sustrato litológico y la contaminación halófila pueden ser interpretados o analizados a través de un SIG utilizando datos de teledetección. Fan, Li y Miguez-Macho (2013) mediante el uso de

imágenes geocodificadas, procedentes de sensores satelitales, ha creado un mapa global hidro-geomorfológico para estimar en términos cuantitativos el nivel freático de las zonas con potencial de agua subterránea a nivel mundial.

Minor, Carter, Chesley, Knowles, y Gustafsson (1994) desarrollaron una estrategia de interpretación integrada para identificar y tipificar los lugares y su tipo de agua subterránea en Ghana utilizando un SIG. Gustafsson (1993) ha utilizado los SIG en el análisis de datos derivados de imágenes Spot o de teledetección en infrarrojo para mapear el potencial de las aguas subterráneas en función de ciertas características geohidrológicas detectadas. Para evaluar la disponibilidad de agua subterránea en el distrito noroeste de Florida, Richards, Roaza, y Pratt (1996) se apoyaron de un SIG, de ese modo lograron realizar un análisis espacial de los datos. Krishnamurthy, Venkatesa, Jayaraman y Manivel (1996) ha desarrollado un SIG para modelar y delimitar zonas potenciales para extraer agua subterránea de la cuenca de Marvdaiyar, Tamil Nadu, India, mediante la integración de diferentes mapas o capas temáticas derivadas de datos de teledetección. La verificación en campo de este modelo confirmó la eficacia de los SIG para delimitar el potencial y las reservas de agua subterránea. La aplicación de SIG para conocer la disponibilidad de agua subterránea también ha sido realizada por Teevw (1995), y Sander (1997).

Un modelo geohidrológico fue desarrollado por Das, Behera, Kar, Narendra, y Guha (1997), para deducir lógicamente las zonas con alta probabilidad de albergar agua subterránea cerca del río Sali, distrito de Bankura, Bengala Occidental, India. En este caso, el análisis se pudo realizar gracias al empleo eficiente de capas temáticas (tal como: la geología, la geomorfología, la densidad de drenaje, la pendiente así como los mapas de uso de la tierra y cobertura del suelo) que fueron procesadas mediante la aplicación de herramientas de análisis territorial incluidas en software libres como: GvSIG, QuikGrid, y otros software de patente como Surfer 10 y 3D Route Builder. Es preciso señalar que a través de la teledetección es posible conocer el estado geohidrológico en que se encuentran las aguas subterráneas, por lo que se puede inducir o planificar la recarga artificial de estructuras geológicas, tales como: tanques de percolación, diques de contención. Por ejemplo, para el caso de la subcuenca del río Bravo-San Juan, se intenta ubicar con precisión en cuales zonas de la cuenca alta, la infiltración es más eficaz para la

recarga de las aguas subterráneas, con miras a optimizar la administración del vital líquido, puesto que actualmente mientras el agua del campo Mina, contribuye al desarrollo de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey, los habitantes del municipio de Mina sufren de escasez de agua.

Descripción del área de estudio

El acuífero número 1908, denominado Campo Mina, del estado de Nuevo León (N. L.), México es el más importante centro de abasto de agua subterránea de la ciudad de Monterrey. Ahora bien, considerando el rápido crecimiento la población y el aumento de la urbanización, y en consecuencia, el aumento de la demanda de agua en las zonas conurbadas e industriales, es de capital importancia conocer a detalle su geo-hidrología.

Pese a que existe una creciente conciencia de la necesidad de cuidar los recursos hídricos para mantener el requerido equilibrio medioambiental, todavía se desconoce la alta interdependencia entre los usuarios del agua y la disponibilidad de dicho líquido en el subsuelo, debido a que sólo se conoce a nivel esquemático el movimiento del agua subterránea dentro del ciclo hidrológico de N. L.

En el extremo sureste de la cuenca del Río Bravo, se encuentra la subcuenca Río Bravo-San Juan, en la parte norte de esta subcuenca se localiza la micro-cuenca del río El Potrero, que es la zona de extracción del campo Mina. Topográficamente está situado a unos 36 km al noroeste de la ciudad de Monterrey, N. L., México. La parte alta de la cuenca del río El Potrero se consideró para el estudio del campo Mina (Figura 1).

climas semi-áridos, todos con ligeras precipitaciones durante la temporada de lluvias, de junio a octubre, con un promedio total de 680 mm por año.

La red fluvial de la subcuenca Río Bravo-San Juan, en su porción occidental tiene un densidad de drenaje de 6 km/km², mientras que en su porción oriental la densidad de la disección disminuye a 4 km/km². Sus tres ríos principales son el río Salinas, el río Pesquería y el río San Juan. El río Salinas se origina al suroeste del ejido El Jaralito, municipio de General Cepeda, Estado de Coahuila, y se une al río Pesquería en la frontera occidental del municipio de Marín, N. L. El río Pesquería se origina en las colinas del este del pueblo Chupaderos del Indio, municipio de García, N. L., y se une al río San Juan cerca del pueblo de Dr. Coss, aguas abajo de la presa El Cuchillo. El río San Juan nace cerca del poblado Laguna de Sánchez, municipio de Santiago, N.L. En la subcuenca río Bravo-San Juan el riego todavía se realiza con agua de escorrentía, sin embargo, debido a la expansión de la frontera agrícola, poco a poco esta actividad hace uso del agua subterránea, sobre todo durante la temporada de estiaje.

La subcuenca del río San Juan se compone principalmente de conglomerados, arenisca con conglomerado y areniscas de edad Terciaria (43%). En la parte suroccidental de la subcuenca (Cretáceo inferior) se encuentran una serie de rocas calizas y calizas con lutitas (25%). El resto de la subcuenca está ocupada por el aluvión cuaternario, cuyos espesores van de 300 a 600 metros de profundidad (Figura 8).

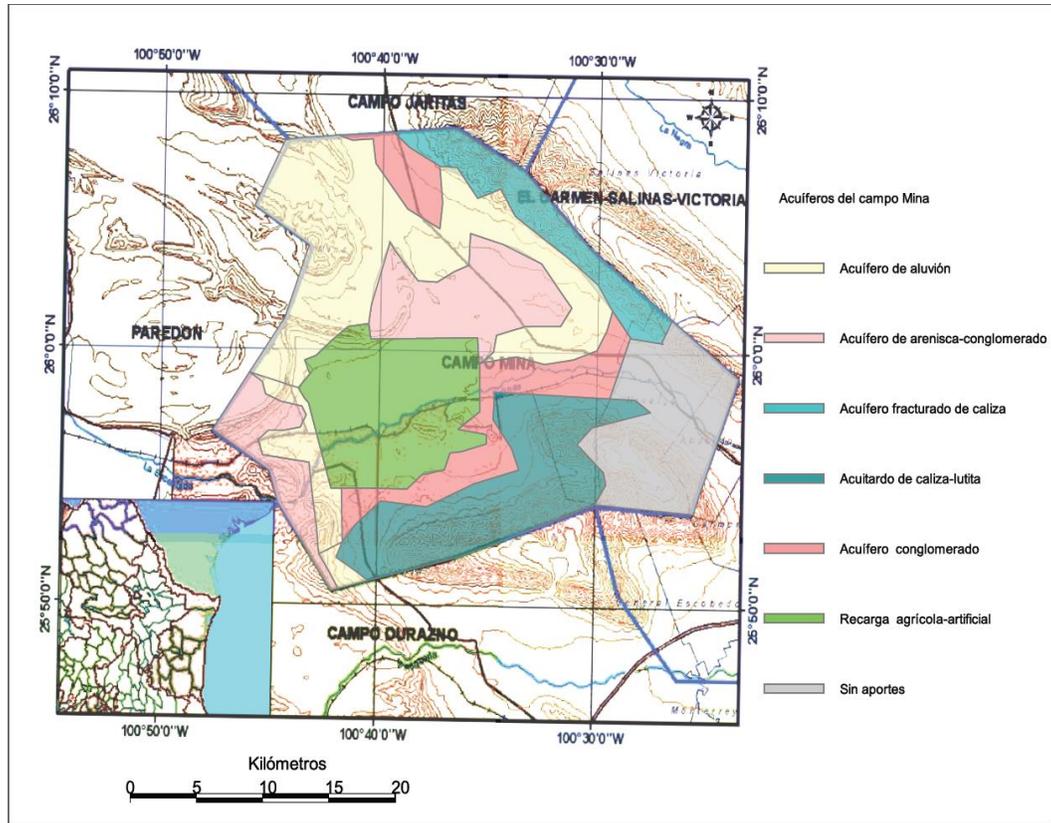


Figura 8. Tipos de Acuíferos del campo Mina, Nuevo León. Fuente: elaboración propia.

En términos agrícolas, en la parte noroccidental de la subcuenca del río San Juan, los principales cultivos, en orden de prelación son: maíz, frijol, cebada, trigo, caña de azúcar, sorgo y avena. En la parte nororiental se cultiva maíz, sorgo, trigo, frijol, avena, melón, naranjas y nogales. Mientras que en la porción sur de dicha subcuenca se producen: caña de azúcar, durazno, frijol, nogal, papa, trigo y naranjas. De los cuales el frijol, el maíz y el durazno utilizan agua de temporal; el trigo y la avena requieren tanto agua de temporal como agua subterránea; en tanto que la cebada, el sorgo y los nogales son los principales cultivos comerciales que se riegan utilizando agua de pozo a pesar de que su huella hídrica es de las más elevadas.

La subcuenca del río Bravo-San Juan, conforme a la clasificación climática de García (2004) tiene cuatro climas tropicales, dos climas

templados y 11 climas áridos. El clima (A)C(w0)x' cubre aproximadamente 4 000 km² (la mayor parte) del centro de dicha subcuenca. Sin embargo dado que su precipitación cae en terrenos que están 370 metros por debajo del campo Mina, dicha precipitación, por abundante que sea no contribuye a la recarga del acuífero bajo estudio (el mismo caso existe entre los climas secos del oriente de la subcuenca: BS1(h')w; BS1(h')(x') y BS0(h')(x')). Por otra parte, el clima (A)C(w1) cubre aproximadamente 1,100 km², la mayor parte de su precipitación (1020 mm/año) escurre hacia el oriente de la cuenca, sin embargo el agua de infiltración discurre en dirección nor-noroeste hacia la zona donde se encuentra el campo Mina. Esto es debido a la dirección preferencial del fallamiento geológico de la Curvatura de Monterrey. Esta misma situación puede experimentar el agua de infiltración de los clima C(w1) y (A)C(w2) cuya máxima precipitación promedio llega a ser de 880 y 1360 mm anuales respectivamente.

Por lo que estrictamente en términos climatológicos, la recarga efectiva del campo Mina, dentro del territorio de N. L., sólo proviene de tres climas secos, a saber: BWhw cuya extensión dentro de la subcuenca es de 2,100 km² y cuya máxima precipitación es de 200 mm/año; BS1hw cuya extensión es de 2,700 km² y una máxima precipitación de 760 mm/año; y BS0hw con una extensión de 1,400 km² y una precipitación de 400 mm/año (Figura 2).

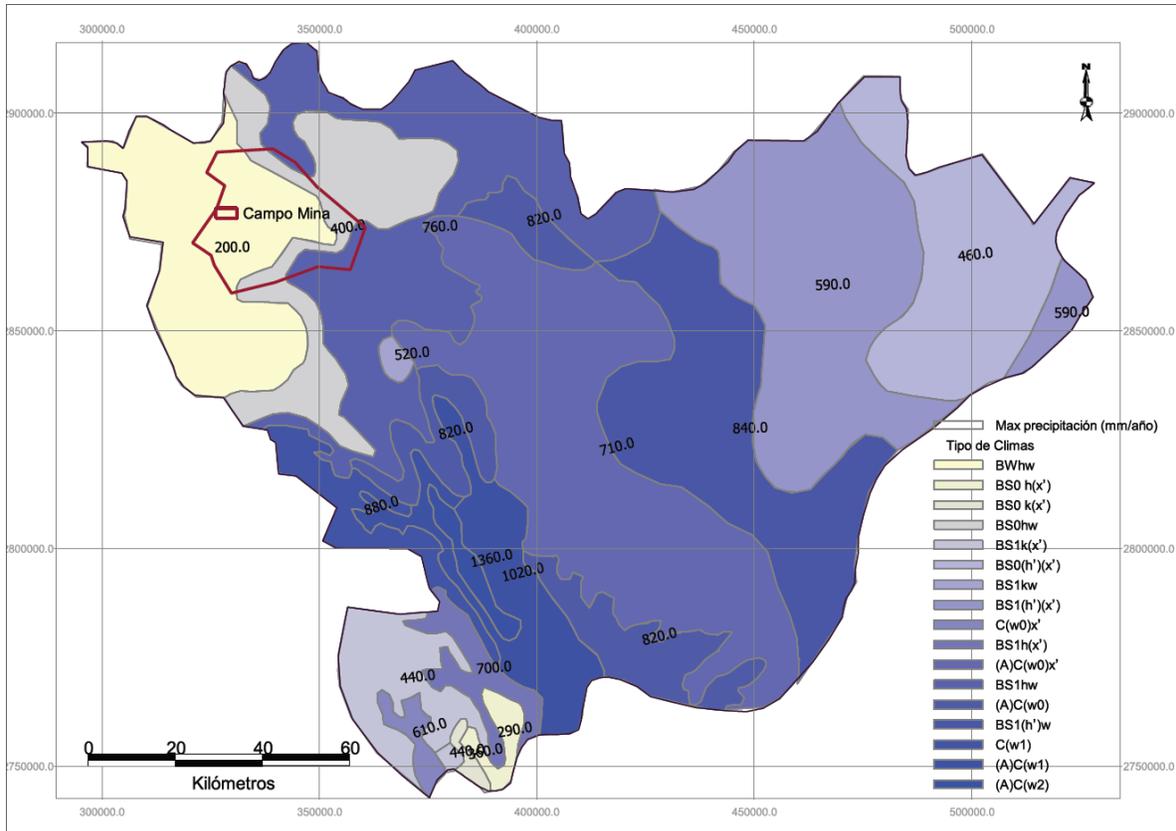


Figura 2. Climatología de la sub-subcuenca río Bravo - San Juan.
Fuente: elaboración propia con base en García, 2004.

Para complementar, se sabe que las pequeñas bombas de agua manuales (grifos) y norias tradicionales en los últimos 40 años han sido sustituidas por molinos de viento o por bombas eléctricas para extraer el agua freática del campo Mina. Hoy en día los molinos de viento tienen una altura promedio de 10 m, un rendimiento promedio de 20 a 30 m³/día y pozos de extracción que tienen una profundidad de 40 a 80 m. Las bombas eléctricas de 15 HP operan a una profundidad límite de 50 m, y tienen un rendimiento de 100 a 300 m³/día. El manejo de este caudal de aguas de extracción es suministrado a través de tanques de 10 m³, diques y canales agrícolas. Por tal motivo, en la última década, la extracción del agua freática del campo Mina debe haber aumentado quinientos por ciento (caso de pozos no regulados o clandestinos).

Metodología

Los datos utilizados en el estudio fueron trabajados con percepción remota y varios sistemas de información geográfica. Por ejemplo, la topografía del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015), fue completada con datos provenientes de Google Earth con la intención de crear un modelo digital de elevación (MDE). La cartografía temática fue compilada de distintas fuentes nacionales e internacionales, cuyas escalas oscilaron de 1: 2 000 000 (mapas de climatología) a 1: 250 000 (mapas de geología), etcétera.

Para elaborar el modelo digital de elevación y fusionarlo con el modelo tridimensional de potencial de agua subterránea (Figura 3) se procedió de la forma siguiente: primero se recopilaron los distintos conjuntos de datos vectoriales topográficos de las 95 cartas, escala a 1: 50 000 (INEGI, 2015), que se requieren para cubrir el estado de N. L., luego tales datos se mapearon en GvSIG en un sólo layer o capa, después se les cambió el formato, de .shp a .dbf para su modelación en el software Surfer 10.

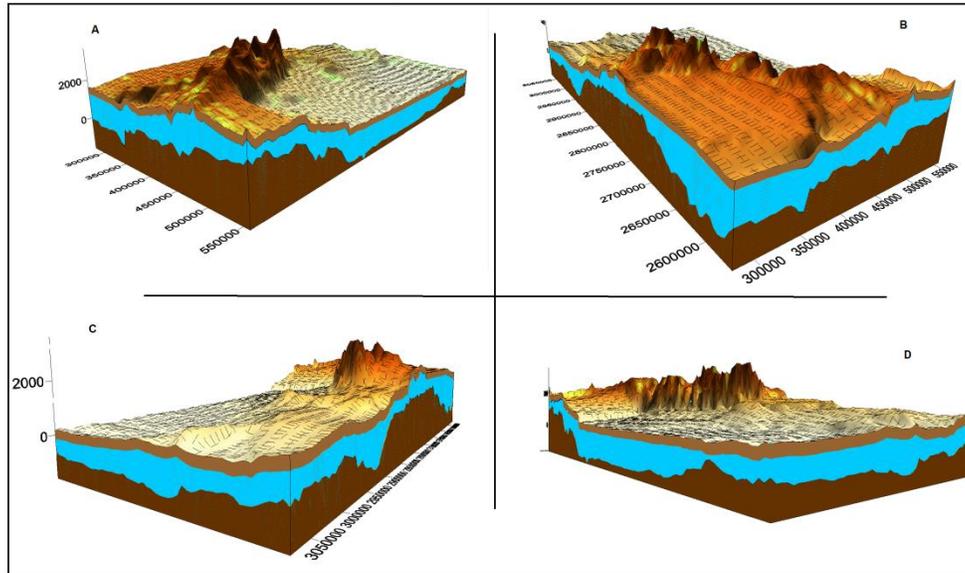


Figura 3. Modelo digital del terreno y de la potencialidad de agua subterránea del Estado de Nuevo León. a) vista desde el SE; b) vista desde el SO; c) vista desde el NO; d) vista desde el NE. Fuente: elaboración propia con base en Montalvo, Ramos, Navarro, *et al.*, 2011; INEGI, 2011; Fan, Li, y Miguez-Macho, 2013.

Para modelar el límite superior (nivel freático) de la zona con mayor potencial de albergar agua subterránea se recurrió al mapa de Fan, *et al.* (2013), dicho mapa de nivel freático se pasó de formato raster a formato vectorial para posteriormente emularlo a formato .dbf; para modelar el límite inferior de la zona con mayor potencial de albergar agua subterránea recurrimos al mapa de distribución de las ondas S de Montalvo, Ramos, Navarro y Ramírez (2011), también este mapa se pasó de formato raster a formato vectorial para posteriormente convertirlo a formato .dbf. La precisión horizontal y vertical de los datos conjugados es de 50 metros en promedio.

La creciente disponibilidad de datos de corte geofísico y geológico vinculados a la hidrogeología, derivados de distintas técnicas, tales como: interferómetro, georadar, lidar, ecosonda, resonancia, ortofotodron, espectroscopía de rayos gamma, imágenes satelitales, etcétera, ofrece nuevas posibilidades a las ciencias de la Tierra para profundizar en el análisis de las características cuantitativas y cualitativas del interior de la Tierra. En ese sentido un MDE proporciona

una ágil y básica representación espacial de distintos fenómenos geológicos e hidrológicos vinculados en este caso con la disponibilidad de agua subterránea en una sub cuenca en particular.

Análisis y resultados

Con el fin de delimitar las zonas con mayor potencial de agua subterránea del campo Mina, se prepararon diferentes mapas temáticos a partir de datos de teledetección, mapas topográficos y geológicos, como se mencionó anteriormente. El mapa resultante o mapa síntesis se derivó de la conjugación de varios mapas preexistentes. Los mapas previos a la preparación del mapa de potencial de agua subterránea de la subcuenca río Bravo-San Juan fueron los siguientes.

Mapa topográfico

El mapa base fue confeccionado con el *software* libre *GvSIG* (Figura 4), el cual contiene representados con los símbolos apropiados los detalles siguientes: ríos, cuerpos de agua (tanto perennes y efímeros), caminos, líneas de ferrocarril, manchas urbanas, así como límites territoriales.

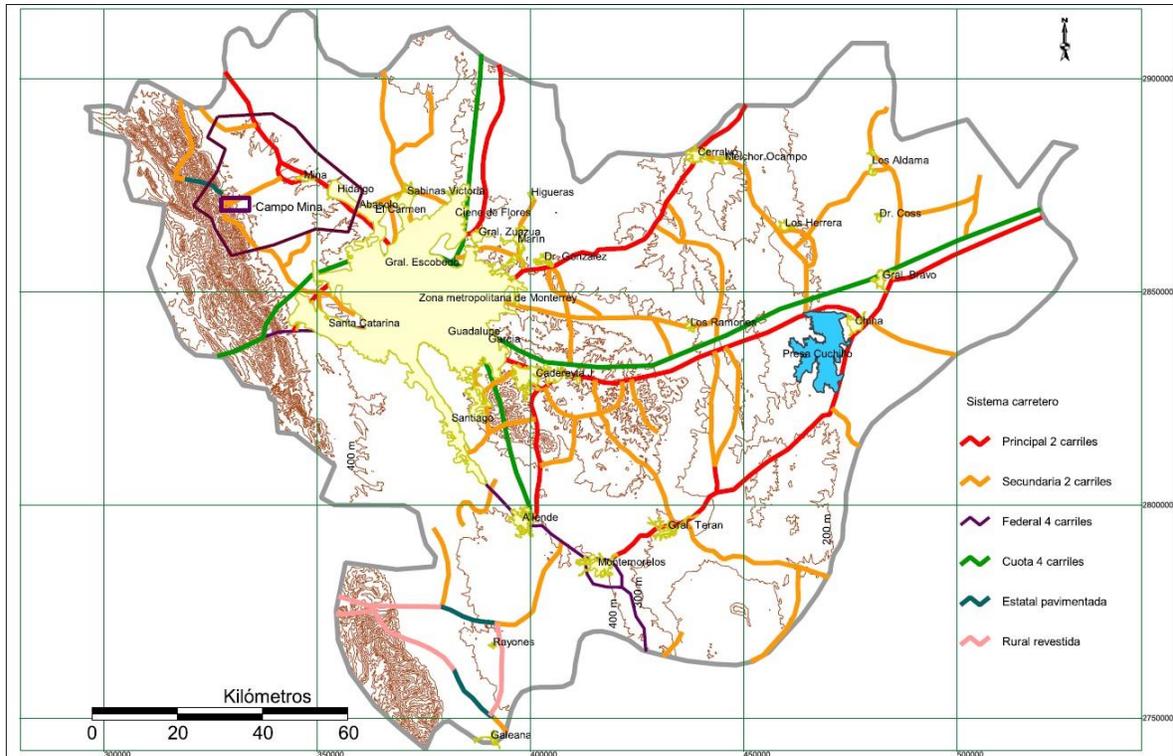


Figura 4. Mapa topográfico de la subcuenca río Bravo-San Juan.
Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2011.

Es importante tener en cuenta que la disponibilidad de agua potable es un gran problema para todas las localidades de la subcuenca del río Bravo - San Juan, empero tal circunstancia se agudiza en la zona metropolitana de Monterrey, puesto que su agua potable tiene que ser transportada desde cientos de kilómetros. El patrón y la conectividad de las carreteras y vías férreas (herencia de la economía de hace más de un siglo) dificulta la planificación a escala regional, pues lugares dispuestos bajo acuíferos o dentro de la zona de influencia de algún cuerpo de agua (presas), viven con niveles de desarrollo cercanos a la línea de pobreza, al tiempo que el vital líquido se traslada a la gran capital. Para tener mayores elementos para el análisis del potencial de agua subterránea de la subcuenca del río Bravo - San Juan, se decidió incluir los detalles del patrón de las líneas de comunicación.

Mapa de pendientes

El mapa de drenaje se expone un extracto del mapa de pendientes de Lugo-Hubp, Aceves, y Córdova (1991), La cuadrícula resultante (clasificada en tres categorías) señala la dirección del flujo de agua superficial. Una trama de la dirección del flujo se muestra en la (Figura 5), dicho patrón indica la dirección del flujo de agua a través de la subcuenca del río Bravo - San Juan.

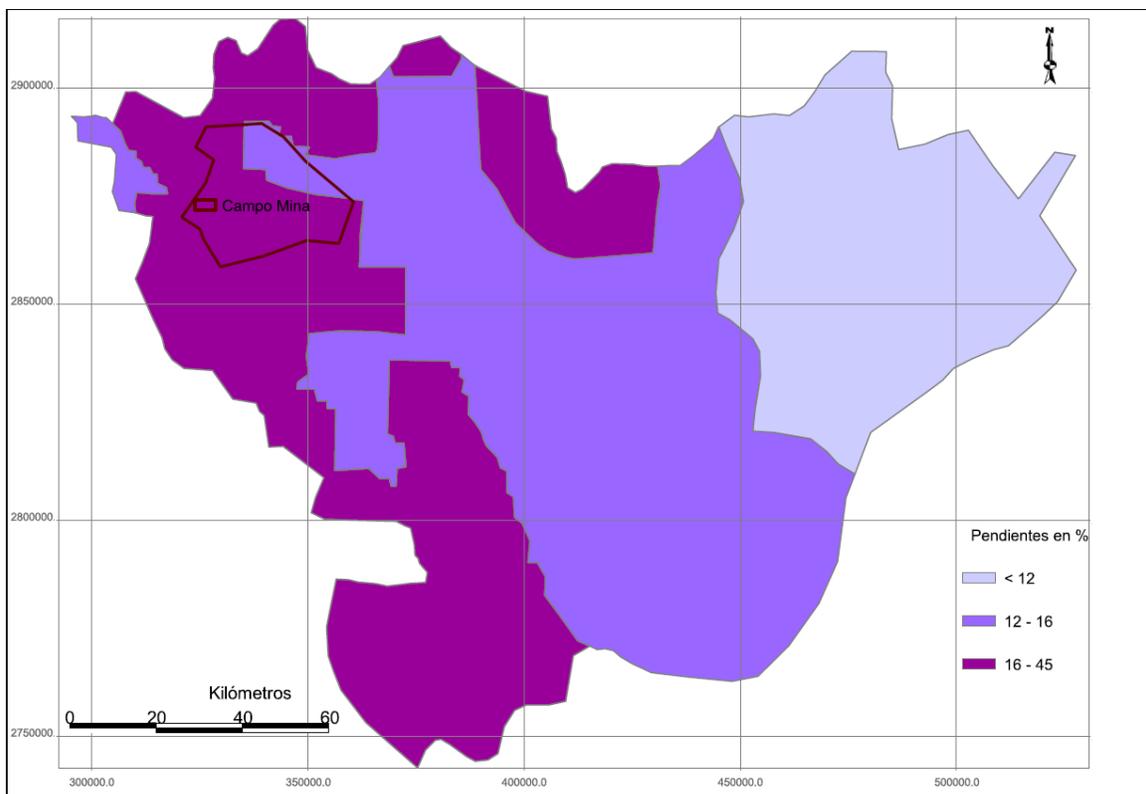


Figura 5. Mapa de pendientes de la subcuenca río Bravo-San Juan. Fuente: elaboración propia con base en Lugo-Hubp, Aceves y Córdova, 1991.

En este caso la dirección preferencial del flujo corre de las pendientes más pronunciadas hacia las más suaves en sentido oeste a este, por tal razón el río Salinas se une al río Pesquería cerca de la frontera occidental del municipio de Marín, N. L., de allí tal río recorre 60 km para llegar a la Presa Marte R. Gómez, pasando la frontera estatal. En función del relieve, la porción oriental de la subcuenca del río Bravo San Juan presenta las mejores condiciones para la recarga de agua de los acuíferos: Agualeguas-Ramones; China-General Bravo; y Campo Papagayos.

Mapa de unidades geológicas

El mapa geológico se preparó mediante la digitalización de cada unidad litológica o tipo de roca en la paquetería del software GvSIG. El mapa de geología de la zona de estudio es un compilado de los distintos estudios geológicos que durante el siglo XX se han realizado en N. L., principalmente desde Mullerried (1946) hasta Montalvo (*Op. Cit.*). De tal modo que cada unidad litológica se clasificó con base en una leyenda geológica general (Figura 6).

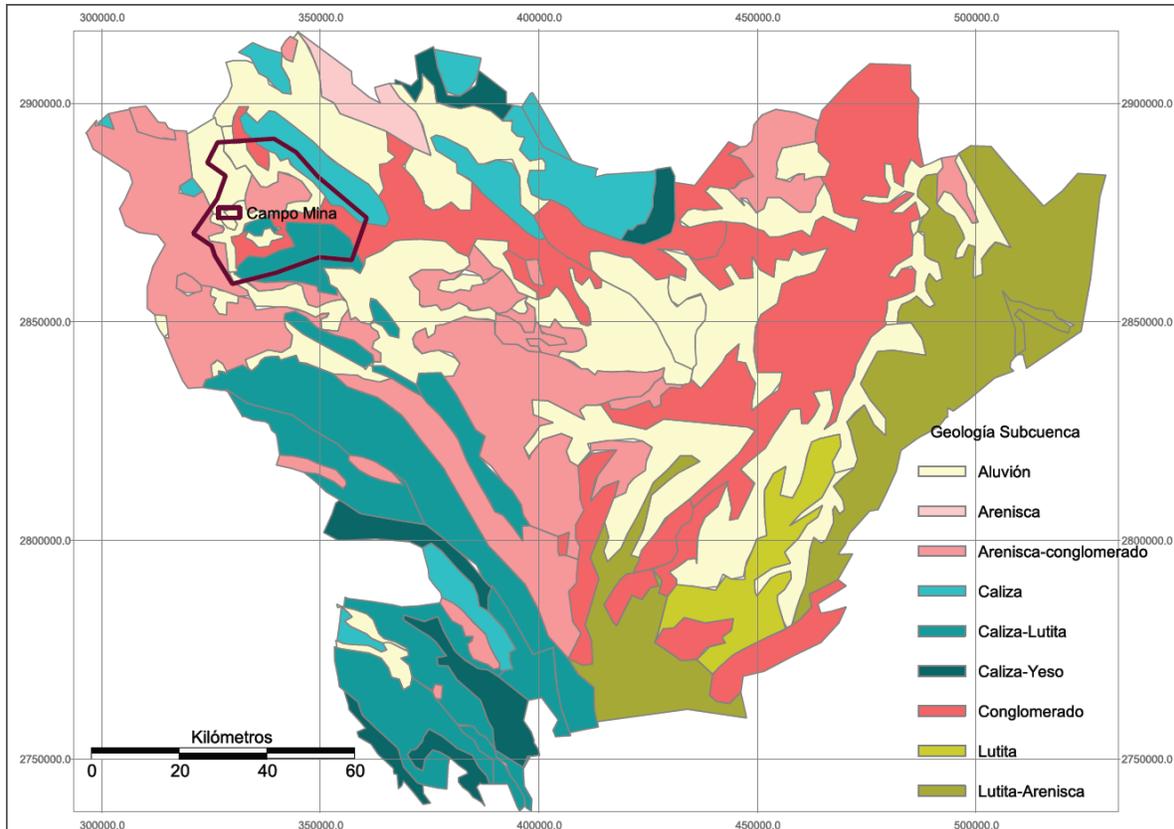


Figura 6. Mapa de unidades geológicas de la subcuenca río Bravo-San Juan. Fuente: elaboración propia con base en Müllerried, 1946; Montalvo, Ramos, Navarro, *et al.*, 2011.

La importancia del mapa litológico radica que en función de la roca madre, se puede inferir la granulometría del tipo de suelo, *ergo*, también las velocidades de infiltración horizontal y vertical se pueden inferir mediante la curva granulométrica de Breddin. En ese sentido la capacidad de infiltración, durante la temporada de lluvias, dados los materiales de la subcuenca del río Bravo San Juan presenta una media de 18 metros por día.

Mapa de pendientes

Las diferentes unidades geomorfológicas se asignaron sobre la base de las características del relieve, extensión, profundidad de la disección, espesor de la deposición, etcétera. La génesis de las formas de relieve, la naturaleza de las rocas o sedimentos asociados a estructuras geológicas se utilizaron para la identificación de las diferentes formas de unidades geomorfológicas. Inicialmente, toda la subcuenca se clasificó en tres zonas principales; mesetas, colinas, y piedemontes de las llanuras, teniendo en cuenta la fisiografía y los aluviones como criterio principal; cada zona fue analizada en diferentes unidades geomorfológicas conforme a los principales rasgos del relieve, como se explicó anteriormente. Posteriormente, dichas características fueron reagrupadas y representadas mediante un mapa de pendientes (Figura 5). Cabe mencionar que las unidades geomorfológicas y demás accidentes geográficos interpretados fueron verificados con trabajo de campo, del cual se obtuvo información adicional en torno a la naturaleza de los distintos materiales de deposición y espesor de la misma.

Mapa geohidrológico

Como se ha señalado, las imágenes de satélite proporcionan una excelente información sobre aspectos hidrológicos, tal como: ríos, canales, embalses, lagos principales, tanques, infiltraciones, zonas regadas con agua subterránea, etcétera. Con toda la información compilada en el SIG, la interpretación puede realizarse mediante la superposición de capas simples o combinadas para su posterior clasificación a través de símbolos apropiados. Para la preparación del mapa geo-hidrológico, de la subcuenca del río Bravo San Juan, la superposición requirió de las siguientes fuentes de información: (i) interpretación de imágenes de satélite, (ii) visitas de campo y entrevistas, (iii) datos meteorológicos, (iv) digitalización topográfica, (v) modelación de zonas de aguas subterráneas, etcétera. Como se ha dicho, la fuente de datos de precipitación se obtuvo del trabajo de

García (*Op. Cit.*). Posteriormente, durante los estudios de campo se corroboró la información necesaria sobre superficie de regadío (sistemas tradicionales como las melgas y huertos de traspatio), aguas subterráneas, patrones de cultivo, áreas de manejo ambiental, pozos existentes, etcétera. Tales datos también se colectaron e incorporaron al SIG para la superposición del mapa geo-hidrológico.

Mapa de uso del suelo

El mapa de uso del suelo de la subcuenca del río Bravo – San Juan fue preparado bajo los diez criterios de clasificación de Anderson (1976), con las respectivas adaptaciones de INEGI (2015). Los datos de entrada de las bandas espectrales LANDSAT que se utilizaron tenían una resolución espacial de 50 m, a partir de ellos se determinaron valores medios para los distintos datos de salida de las distintas clases. El mapa resultante fue corroborado mediante un muestreo aleatorio aplicado en zonas próximas a la red de carreteras y terracerías con que cuenta la subcuenca (Figura 7).

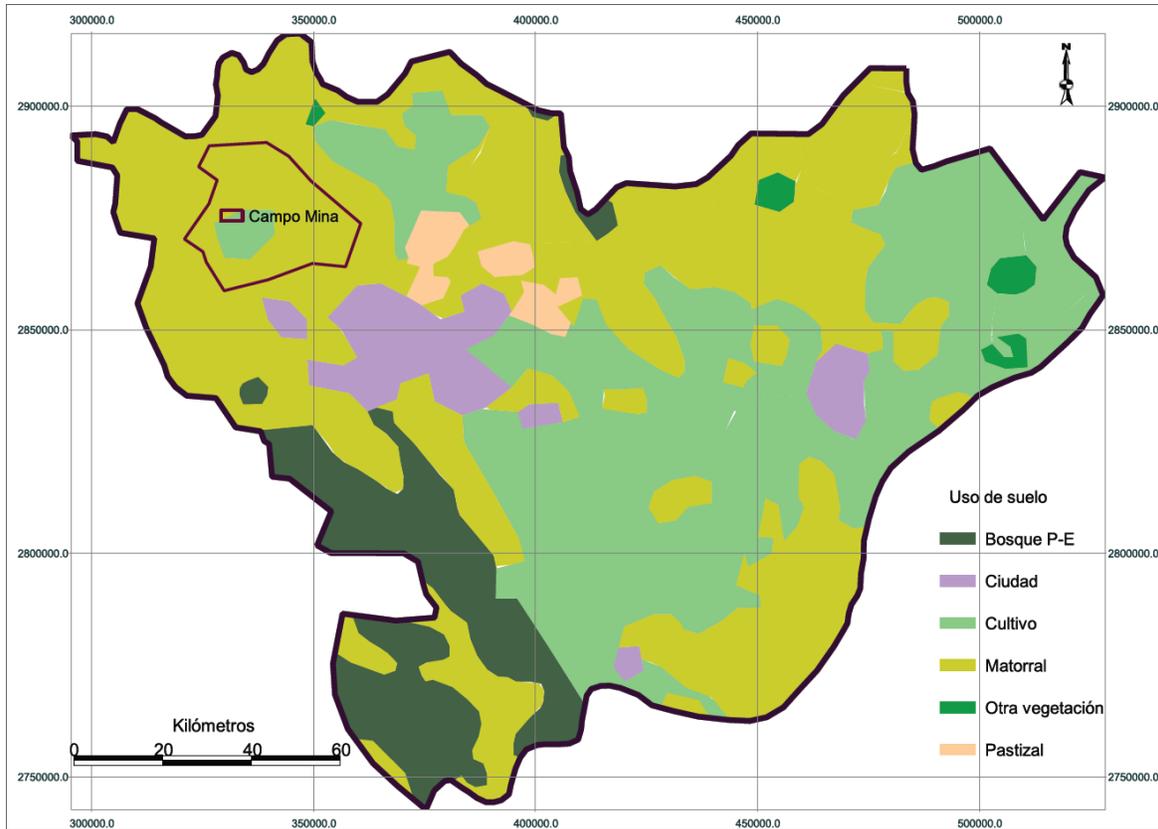


Figura 7. Uso de suelo de la subcuenca río Bravo-San Juan. Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 2015.

Las clases tienen la flexibilidad para fusionar o agrupar una clase distinta en otra en función de los porcentajes de representación espacial de cada cobertura terrestre. Las ubicaciones precisas de las muestras se compilaron en el sistema DEC mediante el uso de un sistema de posicionamiento global, software Garmin-GPS, luego se emularon al sistema universal transversal de Mercator (UTM), con datum NAT27. Se obtuvieron alrededor de 50 muestras por cada clase.

De cada lugar se determinaron los siguientes datos:

- a) Mancha urbana a nivel de manzanas, calles y predios lotificados.
- b) Principales tipos de cultivo (de temporada y perennes).

- c) Bosque de pino encino.
- d) Suelos con amplio porcentaje de pastizal.
- e) Suelos con amplio porcentaje de de arbustos, hierbas, tierras de barbecho, maleza y cultivos silvestres; todos ellos fueron agrupados como matorral.
- f) Otros tipos de vegetación, como hidrófila.
- g) Cuerpos de agua.

En total resultaron cuatro tipos de cobertura vegetal (b, c, d y e) y dos usos de suelo (a y g) para la subcuenca del río Bravo – San Juan (Figura 7). Por lo que se estima que la extensión del área agrícola total irrigada con agua subterránea procedente del campo Mina, principalmente en los municipios de Mina y García es del orden de 12,456 hectáreas. En tanto que 26.1 millones de metros cúbicos es el que se bombea para la ciudad de Monterrey.

Preparación del mapa de potencial de aguas subterráneas del campo Mina

Luego de integrar en un sistema de información geográfica los datos concernientes a información climática, topográfica, litológica, geomorfológica (mapa de pendientes), hidrogeológica (modelo 3d de la disponibilidad de agua subterránea) y del uso de suelo de la subcuenca del río Bravo-San Juan, se procedió a cartografiar la tipificación del agua subterránea del campo de Mina, N. L. (Figura 8) mediante el procedimiento siguiente:

Paso 1: Se creó una nueva capa en el software GvSIG, a la cual se trasladaron las capas (mapas) de climatología, topografía, geología (litología y tectónica), pendiente del terreno, disponibilidad estimada de agua subterránea y de uso de suelo. Todo ello con la intención de realizar diversas superposiciones, por ejemplo entre los mapas de litología y climatología, entre disponibilidad de agua y topografía,

etcétera. Tal ejercicio nos permitió ir identificando unidades de disponibilidad potencial de agua subterránea, las cuales en función de los distintos cruces se les fue asignando un código alfanumérico (Por ejemplo, CL1-L1, para signar zona de elevada tasa de precipitación con óptima litología para la infiltración, etcétera), es decir, tal código alfabético, finalmente representa un dato proxy del potencial del agua subterránea del campo Mina, N. L.

Interpretación geo-hidrológica del campo Mina

Actualmente el campo Mina (un polígono compuesto de veinte formaciones acuíferas) tiene un potencial geohidrológico anual de 9.33hm^3 (hectómetros cúbicos o millones de metros cúbicos). Cuya modelación hidrogeológica, conceptualmente, puede clasificarse mediante siete principales puntos acuíferos (Figura 8), los cuales sirven de referencia para conocer las características del potencial del agua subterránea de cada acuífero de dicho campo, así como su balance hídrico, la dinámica de las áreas de recarga, entre otras características de importancia hidrológica para la planificación agroindustrial de la parte occidental de la subcuenca río Bravo-San Juan bajo contexto de cambio climático.

De acuerdo con el mapa de la Figura 8, los depósitos de aluvión del campo Mina representan la mayor extensión territorial, unas 23 mil ha., las cuales, dado su régimen de precipitación y tasa de infiltración, aportan al acuífero poco más de 1.5 millones de metros cúbicos de agua (16.15% del total). Los cuales, tomando en cuenta una curva de Breddin de 9.5m/día, y una distancia media de 13km entre las áreas de recarga y los puntos de extracción, la tasa de recarga del ciclo natural del agua freática, para este caso, es de aproximadamente 3.5 años.

En función de la extensión territorial, la zona de cultivos es a la vez el área de máxima recarga artificial del campo Mina, la cual aporta un estimado de $3\ 928\ 007\ \text{m}^3$ (42% del total). Dicho polígono, se constituye mayoritariamente por un aluvión, seguido de un conglomerado y una pequeña porción de caliza-lutita. Tomando en

cuenta que el desplazamiento horizontal del agua subterránea, en promedio es mayor a 45m/día, su ciclo geo-hidroológico es de carácter anual.

En la porción sur del campo Mina, existe un sustrato geológico compuesto de roca caliza con lutita, que dada su baja curva de Breddin (2m/día), se ubica geo-hidroológicamente como un acuitardo. Pues pese a que este sustrato geológico, en combinación con su régimen pluviométrico, es el de mayor aporte de agua por infiltración anual (1.64 hm³/año), correspondiente al 18% de la recarga relativa del campo Mina, su ciclo de recarga es muy lento (mayor a 6 años y medio), además de que sus aguas subterráneas, dado un análisis topográfico de la cuenca del campo Mina, se infiere que son absorbidas por el río Salinas. De modo que es necesario profundizar los estudios en esta parte del campo Mina, para precisar la dinámica de dicho acuitardo.

Al sureste del campo Mina se encuentra un área conformada principalmente por tres unidades geológicas: una de caliza, otra de caliza con conglomerado, y una más hecha de conglomerados, las cuales, debido a una barrera topográfica no contribuyen a la recarga del campo Mina; además de que la zona en donde se ubican los pozos se encuentra aguas arriba de tales sustratos geológicos. Aquí es recomendable valorar la posibilidad de abrir nuevos pozos de extracción para la planificación de la agroindustria local.

En el centro norte del campo Mina se encuentra una porción de arenisca con conglomerado, la cual contribuye con medio millón de metros cúbicos de agua (0.51 hm³) de infiltración anual (5% del total). La cual de acuerdo a su curva de Breddin corresponde a un movimiento horizontal de 43m/día, en ese sentido su ciclo de recarga es prácticamente anual, siempre y cuando se tome en cuenta una distancia promedio de 6 km, entre las áreas de recarga y la zonas de extracción.

Finalmente, al norte-noreste del campo Mina se encuentra una loma de 9 millones de ha., constituida básicamente de pura roca caliza, la cual contribuye con alrededor de 800 mil metros cúbicos de agua de infiltración anual al campo Mina (equivalente al 8%). De la cual su ciclo geo-hidroológico, estimado a partir de una tasa horizontal de 600m/día, es el más dinámico de todo el conjunto, pues teóricamente allí, el agua de lluvia tarda 15 días en llegar del área de recarga a las zonas de extracción (situada esta última a una profundidad de nivel freático de 80m). Ahora bien, debido a la configuración topográfica y al régimen de

lluvias que experimenta dicho cuerpo geológico, si se considera el agua de rocío y la de neblina, dicho sustrato anualmente aporta adicionalmente otros 700 mil m³ de agua al acuífero bajo estudio. Por lo que esta pequeña loma de caliza es uno de los puntos más importantes de recarga.

Conclusión

En cuanto al mapeo de los recursos de aguas subterráneas, se ve que éste se ha ido implementando poco a poco en los últimos años debido a la mayor demanda de agua. Los datos más comúnmente disponibles para el estudio de las aguas subterráneas son la información geológica, geomorfológica e hidrológica. En este estudio se caracterizó el potencial de agua subterránea de las diversas zonas que conforman el campo Mina utilizando técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca del río Bravo San Juan. Para delimitar la disponibilidad de agua subterránea de la subcuenca del río Bravo San Juan, se digitalizaron varios mapas temáticos, tal como: mapa litológico, geológico, mapa de pendientes, entre otros mapas como el de localización, climatología, topográfico. Para ello fue requerido hacer uso de varios software, tal como: GvSIG, Google Earth, Qgrid, Surfer, 3D Route Builder; entre otros. Todos los mapas resultantes fueron integrados para la confección del mapa de disponibilidad de agua subterráneas del campo Mina, perteneciente a la subcuenca río Bravo-San Juan.

De acuerdo con el análisis, el campo Mina está compuesto por cinco unidades geomorfológicas que actúan como acuíferos no confinados, a saber: aluvión cuaternario; colinas de caliza, conglomerados; areniscas; y piedemonte de caliza con lutita, así como una zona de recarga artificial y una formación geomorfológica al este aún no explotada. En donde, desde el punto de vista geomorfológico, las colinas de caliza, en efecto, resultaron ser zonas de elevado potencial para extracción de agua, sin embargo desde el punto de vista agroindustrial, el centro del campo

Mina (zona de cultivos), al tener un mayor óptimo de recarga artificial, puede considerarse como la zona de máximo potencial para la extracción de agua. Los aluviones cuaternarios, así como los conglomerados y las areniscas, pueden considerarse como zonas de mediano potencial para extraer agua subterránea, mientras que el acuitardo del sur del campo Mina, compuesto de roca caliza con lutita resulta ser una zona de bajo potencial para extraer agua. Por último, no hay que olvidar que en la porción oriental del campo Mina, aún existen reservas de agua con un mediano potencial pero que aun no han sido exploradas ni explotadas.

Por otra parte, si se compara el volumen de recarga anual de los acuíferos del campo Mina (9.33 hm^3) con el volumen de extracción del mismo (35 hm^3) se nota que la política de suministro de agua, principalmente para la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey, se apoya en la extracción de agua de algún acuífero confinado en el campo Mina. Tal acuífero profundo es independiente a los ciclos de recarga actual, cuya media es de cuatro años.

Esta es la razón por la cual pese al déficit de extracción mayor a 25 hm^3 anuales, el campo Mina, todavía no da muestras de abatimiento, ya que sus conos de abatimiento no son pronunciados, y los saltos en los niveles piezométricos de los distintos acuíferos que lo conforman, desde hace décadas oscilan los 15 metros en promedio.

Ahora bien, si se considera la red de drenaje (ríos, arroyos y grandes masas de agua) que la cuenca en su porción occidental tiene menor capacidad de captación de agua que su porción oriental. Por lo que extraer agua geológica del campo Mina para abastecer a la zona metropolitana de Monterrey no tiene relación con la extracción de agua freática que se realiza de manera local en el municipio de Mina, N. L. Sin embargo la falta de diferenciación entre el ciclo hidro-geológico, del acuífero de calizas del campo Mina, del ciclo hidro-anual de la arenisca con conglomerado, por citar un ejemplo, ha sido causa del incremento de la vulnerabilidad hídrica de los pobladores del municipio de Mina. Por lo que es necesario precisar que ésta disponibilidad de agua no depende de la climatología actual, sino del agua acumulada en tiempo geológico.

Finalmente, para profundizar en el comportamiento hidráulico de las formaciones en comento, es necesario elaborar un mapeo geohidrológico continuo a escala 1:5 000 del área de estudio, prestando especial atención a la definición cartográfica de las unidades

litoestratigráficas de mayor interés hidrogeológico, al tiempo de ampliar la red de observación piezométrica, con miras a mejorar la planificación del suministro de agua geológica del campo Mina.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de doctorado. A la Universidad Autónoma de Nuevo León y en especial al Instituto de Investigaciones Sociales (IINSO).

Referencias

- Anderson, J. R. (1976). *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data*. Washington, USA: US Government Printing Office.
- Arizabalo, R. y Díaz, G. (1991). *La contaminación del agua subterránea y su transporte en medios porosos*. D.F, México: Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Das, S., Behera, S. C., Kar, A., Narendra, P., y Guha, S. (1997). Hydrogeomorphological mapping in ground water exploration using remotely sensed data—a case study in Keonjhar District, Orissa. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 25(4), 247-259.
- Fan, Y., Li, H., y Miguez-Macho, G. (2013). Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339(6122), 940-943.
- Gustafsson, P. (1993). High resolution satellite data and GIS as a tool for assessment of the groundwater potential of a semi-arid area. In: *9th thematic conference on geologic remote sensing*, vol. 1, p. 609–619. Pasadena, USA: Environmental Research Institute Of Michigan.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática , INEGI. (2001). *Marco geoestadístico municipal, 2000*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática , INEGI. (2015). *Carta topográfica escala 1: 1000 000 Monterrey*.

- Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI. (2015). *Carta de uso de suelo y vegetación 1: 250 000 Serie V Monclova G14 -4*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Krishnamurthy, J., Venkatesa Kumar, N., Jayaraman, V., y Manivel, M. (1996). An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and a geographical information system. *International Journal of Remote Sensing*, 17(10), 1867-1884.
- Lugo-Hubp, J; Aceves, J; y Córdova, C. (1991). Morfometría 2. En *Atlas nacional de México. Naturaleza*, (Tomo II,). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kasenow, M. (2001). *Applied ground-water hydrology and well hydraulics*. Denver, Colo: Water Resources Publications.
- Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources* (Vol. 1). CA, USA: ESRI, Inc.
- Minor, T. B., Carter, J. A., Chesley, M. M., Knowles, R. B., y Gustafsson, P. (1994). *The use of GIS and remote sensing in groundwater exploration for developing countries*. In: *Proceedings of the tenth thematic conference on geologic remote sensing*. San Antonio, Texas, USA: Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI.
- Montalvo, J. C., Ramos, L. G., Navarro, I., y Ramírez, J. A. (2011). Una aproximación a la regionalización sísmica del estado de Nuevo León, basada en velocidades de propagación de ondas de corte y evidencias geología. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(2), 217-233.
- Mullerried, F. (1946). *Geología del Estado de Nuevo León*. México: Instituto de Investigaciones Científicas de la Universidad de Nuevo León.
- Richards, C., Roaza, H. P., y Pratt, T. R. (1996). Applying GIS to groundwater assessments. In *Proceedings of AWRA symposium on GIS and water resources held in Ft. Lauderdale, Florida. USA: Florida Ft. Lauderdale*.

- Sander, P. (1997). Water-well siting in hard-rock areas: Identifying promising targets using a probabilistic approach. *Hydrogeology Journal*, 5(3), 32-43.
- Teeuw, R. M. (1995). Groundwater exploration using remote sensing and a low-cost geographical information system. *Hydrogeology Journal*, 3(3), 21-30.