

Comportamiento geohidrodinámico del acuífero somero del Campo Durazno, Nuevo León, México

Geohydrodynamic behavior of the shallow aquifer Campo Durazno, Nuevo León, Mexico

Lilia E. Arriaga-Díaz de León^{1*}, Liliana G. Lizárraga-Mendiola², Juan M. Rodríguez-Martínez¹,
Arquímedes Cruz-López¹, Héctor de León-Gomez¹, Armando Y. Sánchez-Gaona¹, Juan A. Valero-Almaguer¹

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Fidel Velázquez S/N, San Nicolás de los Garza, Nuevo León C.P. 66455;
Correo electrónico: liliaead@yahoo.com

² Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

*Autor de correspondencia

Resumen

En este trabajo se analizó el comportamiento geohidrodinámico del acuífero Campo Durazno en su primera unidad geohidrológica, por medio de un modelo que explica su interconexión con el entorno. La metodología que se aplicó fue con base en 36 fuentes de abastecimiento, de los cuales se monitorearon aspectos hidráulicos, geohidrológicos y ambientales. Se realizaron diferentes pruebas en campo y en laboratorio para la determinación de los parámetros químicos e hidráulicos que son la base del modelo. Por medio del modelo propuesto se determinó la dirección del flujo subterráneo; el balance hidrológico indicó una recarga superficial nula, lo que permitió corroborar que la unidad en estudio está en equilibrio en forma hidráulica y geohidrológica. En calidad del agua, se determinaron parámetros físico-químicos en las tres zonas (recarga, transición y descarga), siendo las zonas de transición y descarga las más elevadas en concentraciones de Na⁺ y SO₄⁻ según la normativa nacional e internacional para consumo de agua potable; su presencia se debe probablemente a fuentes de contaminación industrial localizadas en la zona. La geohidrodinámica de la unidad hidrogeológica somera permite concluir que es necesario implementar un plan de gestión ambiental a corto plazo para la conservación sostenible del acuífero.

Palabras clave: Actividad industrial; geohidrodinámica; Unidad hidrogeológica somera; Campo Durazno; conservación sostenible.

Abstract

In this work the geohydrodynamic behavior of the Campo Durazno aquifer in its first geohydrological unit was analyzed, utilizing a model that explains its interconnection with the environment. The methodology applied was based on 36 sources of supply, of which hydraulic, geohydrological, and environmental aspects were monitored. Different field and laboratory tests were carried out to determine the chemical and hydraulic parameters that are the basis of the model. Employing the proposed model the direction of the underground flow was determined; the hydrological balance indicated a null surface recharge, which allowed corroborating that the unit under study is in a hydraulic and geohydrological equilibrium. As water, physical-chemical parameters were determined in the three zones (recharge, transition, and discharge), with the transition and discharge zones being the highest in Na⁺ and SO₄⁻ concentrations according to national and international regulations for potable water consumption; its presence is probably due to industrial pollution sources located in the area. The geohydrodynamics of the shallow hydrogeological unit makes it possible to conclude that it is necessary to implement a short-term environmental management plan for the sustainable conservation of the aquifer.

Keywords: Industrial activity; geohydrodynamics; shallow hydrogeological Unit; Campo Durazno; sustainable conservation.

Recibido: 5 de marzo de 2018

Aceptado: 2 de octubre de 2018

Publicado: 23 de octubre de 2019

Como citar: Arriaga-Díaz de León, L. E., Lizárraga-Mendiola, L. G., Rodríguez-Martínez, J. M., Cruz-López, A., de León-Gomez, H., Sánchez-Gaona, A. Y., & Valero-Almaguer, J. A. (2019). Comportamiento geohidrodinámico del acuífero somero del Campo Durazno, Nuevo León, México. *Acta Universitaria* 29, e2220. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2220>

Introducción

Se prevé que para el año 2030 existirá un déficit mundial del 40% en abastecimiento de agua a la población debido a un mal manejo del recurso. Así mismo, se indica que el 50% de la población mundial se abastece del agua subterránea; sin embargo, casi un 20% de los acuíferos se encuentran sobre-explotados o contaminados, principalmente por actividades humanas (*United Nations Educational Scientific and Cultural Organization [UNESCO], 2015*). Debido a la creciente demanda de la población por nuevas y mejores fuentes de agua potable, un manejo sostenible de los acuíferos requiere la comprensión de su interacción con la superficie, especialmente cuando existe una afectación por causas antropogénicas (*Castegna et al., 2016; Rugel et al., 2015*).

Respecto a lo anterior, es necesario orientar diferentes enfoques que permitan comprender su comportamiento hidrodinámico bajo condiciones naturales y la presencia de agentes contaminantes. Esto lo confirman estudios realizados sobre acuíferos libres ubicados en zonas de crecimientos poblacionales e industriales que ven afectada de forma directa su calidad (*Kumar et al., 2014; Kumar, 2015*). Por ejemplo, *Kim et al. (2017)* analizaron problemas de salinidad mediante indicadores, identificando los procesos hidrogeoquímicos presentes. En otros estudios se resalta la importancia de determinar el tiempo de residencia del flujo subterráneo para un manejo sostenible del acuífero (*Alaa & Ian, 2016; Brkić, Briški & Marković, 2016*). Por otra parte, por medio del uso de software especializado fue posible analizar variables hidrodinámicas que definieran el comportamiento de un acuífero y su interacción con la superficie (*Lachaal, Bédir, Tarhouni, Gacha & Leduc, 2011; Maliva, Herrmann, Coulibaly & Guo, 2015; Movahedian, Chitsazan & Nozarpour, 2016*).

Como parte de esta problemática global, México sufre deficiencias de abastecimiento de agua potable de forma crítica. En el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2014) se resalta que en el país existen 653 acuíferos que presentan graves problemas de contaminación. En el noreste de México, específicamente en la región de García, Nuevo León, el abastecimiento de agua solo se destina a la cabecera municipal y el área metropolitana de Monterrey. Las comunidades aledañas que existen en esta región cuentan con el agua subterránea como una única fuente de abastecimiento. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2014) el acuífero Campo Durazno, identificado con la clave 1909, está catalogado para explotación industrial. Los únicos estudios realizados en este acuífero corresponden a su parte profunda, sin tomar en cuenta la parte superficial, que es utilizada para el abastecimiento industrial (Conagua, 2014). El cuerpo de agua que tiene una interacción con esta parte somera del acuífero es el río Pesquería, el cual ha sido investigado desde 1990 por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). En un estudio se menciona que la relación río-acuífero en esta región del país se encuentra severamente impactada debido a la contaminación (*Torres, 2013*). Los aprovechamientos hidráulicos que existen para abastecer a las comunidades en el área se encuentran en los márgenes del río, comprometiendo de esta forma la calidad del agua de los pozos de extracción en la parte somera del acuífero.

El planteamiento de un modelo hidrodinámico del acuífero se debe apoyar en parámetros hidráulicos, ya que son el soporte de cualquier sistema de flujo en el agua subterránea, tomando en cuenta la piezometría del sitio para determinar los regímenes de explotación (*Morales-Casique, Escolero & Arce, 2015*). *González-Abraham, Fagundo-Castillo, Carrillo-Rivera & Rodríguez-Estrella (2012)* confirman que con apoyo de la litología es posible determinar el tipo y familia de agua de los acuíferos, lo cual permite complementar la hidrogeoquímica de un sistema subterráneo. Así mismo, las concentraciones químicas de los elementos influyen en la recarga natural, al igual que el uso de suelo en la zona de estudio (*Anwar, 2015*). La presencia de iones como cloruro y sodio permiten determinar la interacción con la roca o los agentes antropogénicos que afectan al medio (*MacDonald & Edmunds, 2014*). De la misma forma, en los

sistemas hidrodinámicos de los acuíferos superficiales, es importante analizar las fuentes de contaminación a partir de los cambios de uso de suelo (López-Álvarez, Ramos-Leal, Moran-Ramírez, Cardona & Hernández, 2013). Este trabajo se enfoca en la descripción preliminar del modelo geohidrodinámico en tiempo de estiaje de la unidad hidrogeológica 1 (unidad somera) del acuífero Campo Durazno, que se utiliza para el abastecimiento de las comunidades aledañas a la ciudad de Monterrey. Con este modelo, se pretende destacar además la posible presencia de parámetros físico-químicos de origen antropogénico y sus principales patrones de transporte.

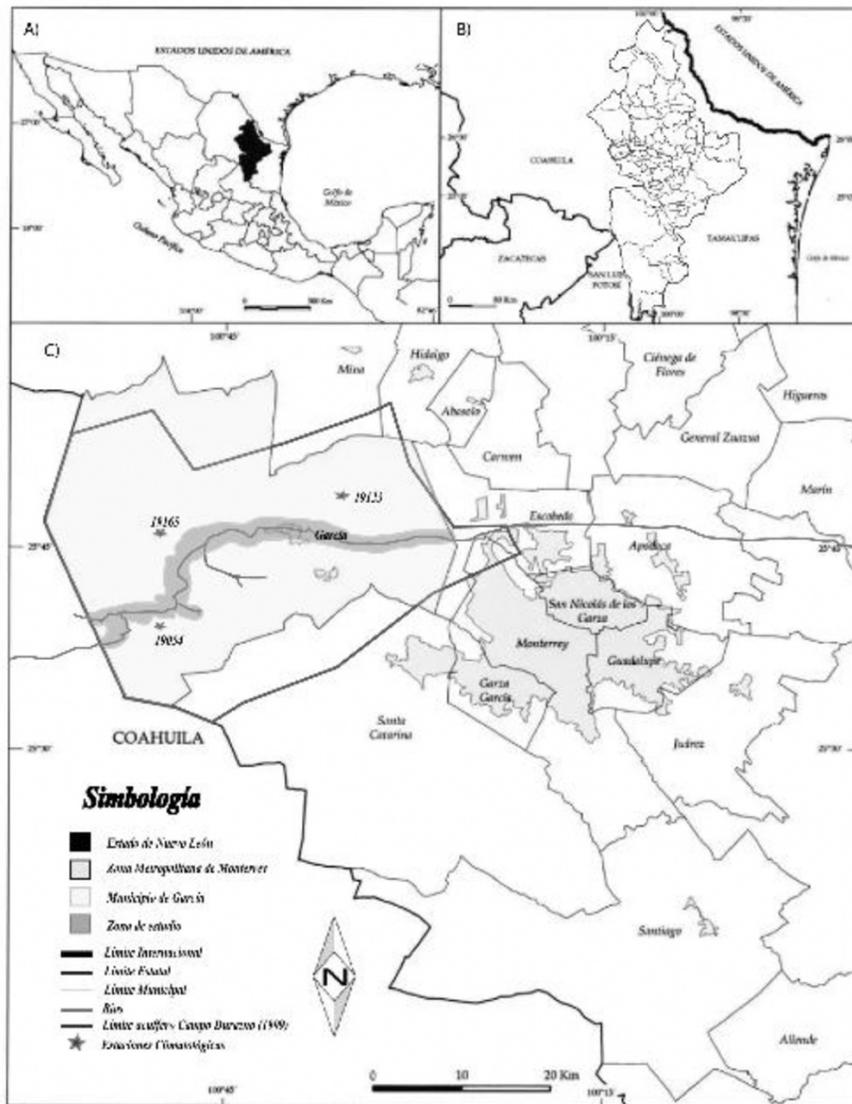
Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

Localización geográfica e hidrología

El acuífero Campo Durazno se encuentra al noroeste en el estado de Nuevo León, México, en el municipio de García, tiene un área de 936.69 km² y un perímetro de 134.6 km (figura 1) (Conagua, 2009). El área urbanizada e industrializada se encuentra cerca de la cabecera municipal, rumbo a la zona conurbada del área metropolitana de Monterrey, aproximadamente a 5.5 km de distancia. Es atravesada en dirección SO-NE por el río Pesquería. La zona de estudio está situada a 25°49´41" latitud norte y a 100°27´24" longitud oeste, con una altitud promedio de 697msnm (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 2015). Para efectos de análisis en este trabajo se acotó un área con un ancho de 1 km a cada margen del río Pesquería, con un área de 112.37 km² y una longitud aproximada de 59.7 km.

En el análisis de variables climatológicas se consideraron 3 estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio (figura 1, tabla 1). Las condiciones climatológicas predominantes tienen una precipitación media anual de 116.88 mm y una evaporación anual de 2254 mm, con un periodo de estiaje que comprende de febrero a agosto y periodo de lluvias de septiembre a enero.



Fuente: INEGI, Garza 1995, Secretaría del Desarrollo 2002 Modificó: Lilia E. Arriaga

Figura 1. Localización de la zona de estudio. A) Contexto nacional; B) Contexto regional; C) Microlocalización y delimitación de los márgenes del río Pesquería.

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (1995). Secretaría del Desarrollo (2012).

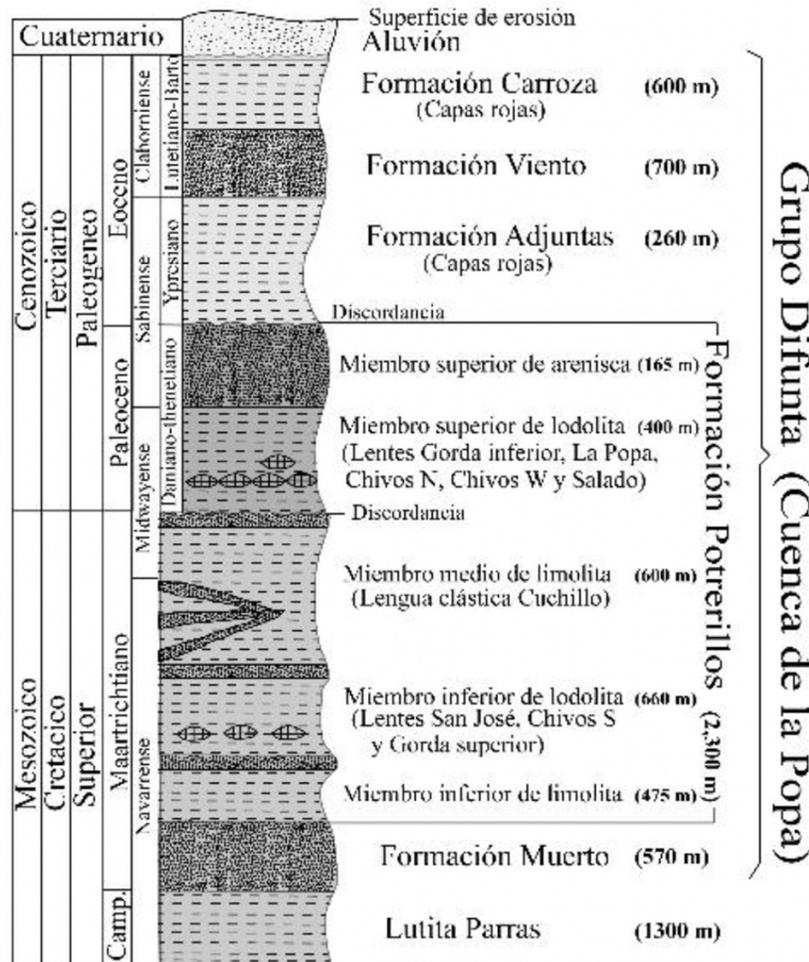
Tabla 1. Estaciones meteorológicas operadas por Conagua (2014).

Estación	Clave	Periodo de información	Precipitación media anual (mm)	Evaporación media anual (mm)
Chupaderos del Indio	19165	1944 a 2013	118.69	1952
Rinconada	19054	1982 a 2013	116.88	2254
Grutas de García	19123	1980 a 2013	125.40	1952

Fuente: Elaboración propia.

Marco geológico y geohidrológico

El área de estudio se encuentra sobre la Cuenca de la Popa (Vega-Vera, Mitre-Salazar & Martínez-Hernández, 1989). Geológicamente se caracteriza por secuencias sedimentarias que van del Campaniano hasta el Terciario temprano, correspondientes al Cretácico. Este patrón de depósito está asociado a un delta progradante, depositando las unidades litológicas que se presentan en la figura 2 y la tabla 2.



Fuente: Vega-Vera et al. (1989), Servicio Geológico Mexicano 2008, Ramírez-Díaz (2012)
Modificado: Lilia E. Arriaga

Figura 2. Columna estratigráfica del Grupo Difunta en la Cuenca La Popa, correspondiente al acuífero Campo Durazno.
Fuente: Elaboración propia con base en Vega-Vera et al (1989); Servicio Geológico Mexicano (2008), Martínez (2012).

Tabla 2. Litología de la cuenca la popa y unidades hidrogeológicas de la zona de estudio.

Nombre	Características litológicas	Unidades hidrogeológicas
Cuaternario Aluvión	Depósitos aluviales de reciente formación de estrato permeable, constituida por depósitos granulares presentes en los valles, producto de los procesos de intemperismo (mecánico y químico) que dan lugar a la formación de acuíferos libres.	Unidad 1

Formación Carroza	Formación más joven del Grupo Difunta (Vega-Vera <i>et al.</i> , 1989). La litología comprende más de 600 m de espesor; está integrada por lodolitas, lutitas y areniscas, con una edad informal del Eoceno Medio	
Formación Viento	Integrada por un espesor cercano a 700 m, compuesto por areniscas y lodolitas de color café grisáceo (Martínez, 2012).	
Formación Adjuntas	Tiene un espesor de 260 metros y está compuesto por capas rojas. Su litología comprende lodolitas, lutitas y areniscas de color rojo, verde y amarillo, aunque existen algunas capas grises en la base y la cima de la formación (Martínez, 2012).	Unidad 2
Formación Potrerillos	Cuenta con un espesor aproximado de 2300 m y contiene lutitas, lodolitas, areniscas, cuerpos lenticulares de carbonato y miembros clásticos (Martínez, 2012).	Unidad 3
Formación Muerto	Está integrada por capas grises de lutita, lodolita y arenisca, con un espesor de 570 m (Martínez, 2012).	Unidad 3
Formación Parras / Formación Méndez	Los afloramientos consisten en una serie de lutitas calcáreas y carbonatadas de color gris oscuro a negro, que intemperizan en tonalidades de color pardo a verde amarillento. Se encuentran estratificadas en capas delgadas, en alternancia con láminas delgadas de limolitas color amarillo ocre; hacia la cima de esta unidad es notable la presencia de vetillas de yeso. El contacto con la Formación Difunta se define solamente por un leve cambio de coloración debido al intemperismo. El espesor promedio de esta unidad formacional en el área estudiada es de 1050 m (Vega-Vera <i>et al.</i> , 1989).	Unidad 3

Fuente: Elaborado propia.

Se destaca que este estudio se enfoca principalmente en la unidad hidrogeológica 1, debido a que ahí se localiza el acuífero libre que actualmente se explota con fines de abastecimiento.

Metodología

Etapas documentales

Para una identificación integral se hizo una recopilación, selección y revisión cartográfica y de imágenes satelitales de la zona de estudio. La base de datos utilizada para la generación de los mapas base fue obtenida del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, claves G14C15 y G14C25), el Servicio Geológico Mexicano (SGM, clave G14-7) y la Conagua (clave 1909).

Etapas de campo

Recopilación de información

En esta fase se realizó un reconocimiento de campo mediante recorridos para verificar la geología de superficie, ubicando las unidades litológicas aflorantes en la zona de estudio (figura 2, tabla 2). Se verificaron los parámetros geológicos de los mapas base y se ubicaron con sus coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), tomadas con un geoposicionador (GPS Garmin Etrex 10). Durante los recorridos se realizó el inventario de fuentes de abastecimiento (pozos y papalotes); se obtuvieron los niveles estáticos, las condiciones físicas de los pozos y características constructivas de los mismos. Se encontraron en total 36 pozos a lo largo de la zona de muestreo, caracterizada por sus condiciones de flujo en tres zonas de la cuenca: recarga, transición y descarga (tabla 3). Según las actividades antropogénicas que se desarrollan en el área, se realizó en paralelo la corroboración de posibles fuentes de contaminación.

Pruebas de bombeo

Después de realizar el censo de aprovechamientos hidráulicos, se seleccionaron las fuentes de abastecimiento para efectuar las pruebas de bombeo con sus respectivos pozos de observación. En estos se tomaron los niveles piezométricos estáticos, tanto del pozo de estudio como el de observación, para después comenzar la toma de datos de los niveles dinámicos de los mismos. Por medio de la medición de los niveles piezométricos en la unidad hidrogeológica 1, fue posible calcular posteriormente en gabinete los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica –K-, transmisividad –T- y coeficiente de almacenamiento –S-).

Para ello se realizaron tres pruebas de bombeo en los pozos G-20 (zona de recarga), G-26 (zona de transición) y G-24 (zona de descarga) (tabla 3). Estas pruebas fueron de corta duración (intervalo de 1 h y 2 h) con toma de datos durante los primeros 10 min a cada minuto; luego a cada 5 min por un periodo de 10 min; durante el tiempo restante, los datos se registraron a cada 10 min hasta finalizar las pruebas. Se utilizaron los equipos de bombeo del sitio, con lo que se obtuvo información base para evaluar de forma descriptiva el comportamiento geohidrodinámico en la unidad hidrogeológica 1.

Tabla 3. Tabla de ubicación de pozos y las diferentes zonas del área de estudio.

Pozo	Coordenadas				Pozo	Coordenadas				Pozo	Coordenadas			
	x	y	z	N.E.		x	y	z	N.E.		x	Y	z	N.E.
	m	m	msnm	msnm		m	m	msnm	msnm		m	m	msnm	msnm
	Zona de recarga					Zona de transición					Zona de descarga			
RF-01	327848	2839586	981	936.5	G-14	334836	2854066	786	760.1	G-24	342960	2855297	706	689.95
RF-04	327671	2839807	1092	1046.56	G-15	334489	2854080	796	765	G-25	340955	2854998	700	690.38
RF-05	327671	2839806	1075	1029.03	G-16	334346	2853595	808	778.8	L-02	350390	2852413	634.9	615.75
RF-07	327073	2841613	1020	987.25	G-17	333899	2854489	782	762.6	L-06	349342	2853133	649.7	621.79
RF-08	328599	2844891	937	909.8	G-18	333966	2854655	781	767.1	L-07	349049	2853990	655.1	613.13
RF-09	328498	2845089	938	908.41	G-19	333595	2854832	793	776.7	L-10	343922	2854976	700	674.08
G-01	327750	2848852	883	858.75	G-26	329293	2852137	837	810.5	L-11	347853	2853641	673	644.89
G-02	328611	2850380	868	855.36	G-11	337272	2855796	728	715.8	L-12	350572	2853043	640	623
G-03	328724	2850548	864	836.41	G-22	337329	2854902	753	734	G-21	340877	2854803	700	685.53
G-05	329031	2851535	851	826.15	G-23	338408	2855743	741	729.8					
G-06	329787	2852141	841	819.08										
G-07	330359	2852280	835	812.6										
G-08	331320	2853265	821	801.78										
G-09	331812	2853823	814	795.58										
G-10	331912	2853904	811	792.36										
G-12	329461	2852040	835	809.07										
G-13	329401	2852453	837	813.56										
G-20	334661	2854597	782	765.25										

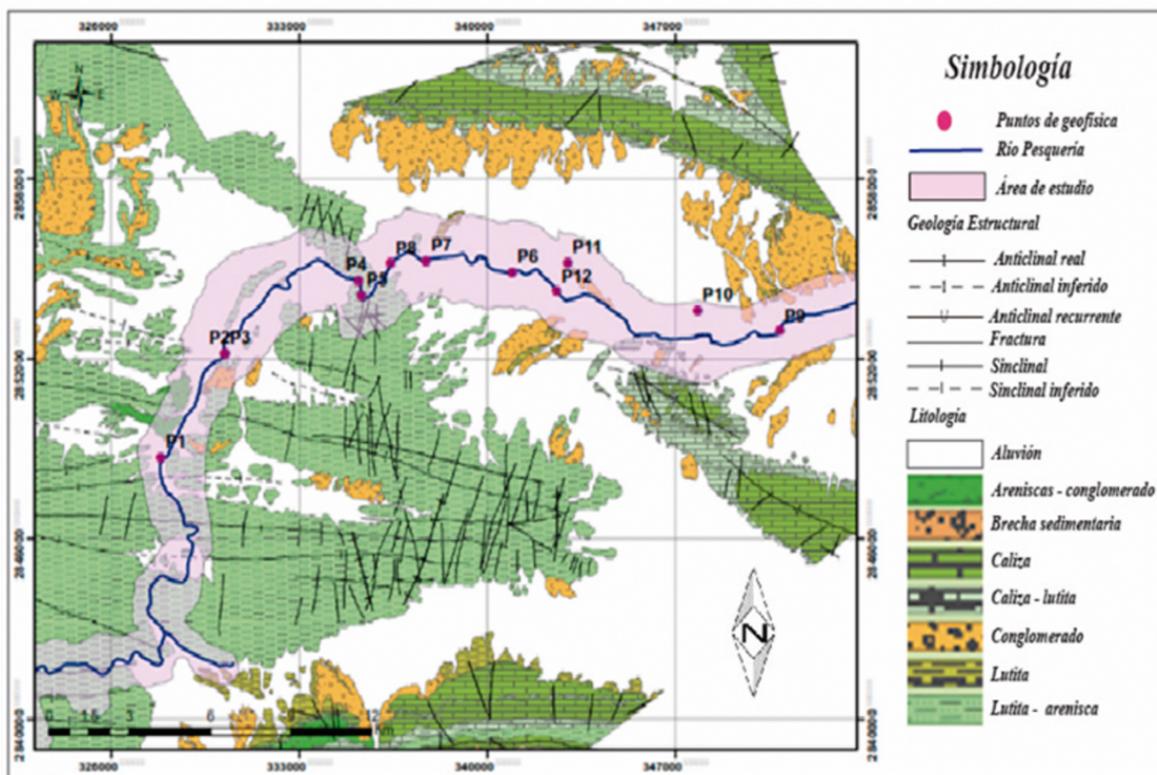
Fuente: Elaborado propia.

Recolección de muestras de agua y medición de parámetros físico-químicos

En la toma de muestras de agua se seleccionaron 16 pozos o aprovechamientos de forma aleatoria para tener una muestra estadística descriptiva de la zona de estudio (tabla 3). La recolección se realizó aplicando la norma nacional para toma de muestras y su conservación (DOF, 2013), en la que se indica que después de bombear el pozo por un tiempo aproximado de 5 min se debe recolectar 1 L de agua, estabilizando y conservando las muestras con un pH cercano a 2. En las mediciones realizadas se usó el equipo Thermo Scientific Orion Star A325 portable, que permitió medir *in situ* algunos parámetros tales como el potencial de hidrógeno (pH, rango de 1-10) y la conductividad eléctrica (C.E. en un rango de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 10 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Una vez almacenadas en hieleras, las muestras se trasladaron a laboratorio para su análisis posterior.

Determinación de la geometría de la primera unidad hidrogeológica

Con apoyo de la geología estructural-regional se realizaron doce perfiles geofísicos con el arreglo dipolo-dipolo a lo largo del cauce del río Pesquería (figura 3). Con esta información se determinó la geometría de la unidad hidrogeológica 1 del acuífero que pasa de semiconfinado a libre en algunos transectos de la cuenca.



Fuente: INEGI 2015, Servicio Geológico Mexicano 2008
Construyo: Lilia E. Arriaga y Juliette G. Rojas

Figura 3. Geología estructural y puntos de sondeos geofísicos en el acuífero Campo Durazno.
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2015), Servicio Geológico Mexicano (2008).

Análisis de datos

Análisis de las muestras de agua en laboratorio

Para llevar a cabo la determinación de los iones presentes en las muestras de agua, se solicitó el servicio del laboratorio de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se aplicaron los métodos para medir conductividad eléctrica (Conagua, 2000), dureza por calcio (*National Environmental Methods Index* [NEMI], 1998), alcalinidad, dureza total, cloruros, color, turbidez, pH, nitrógeno y zinc (NMX-AA-036, 072, 073, 045, 038, 008, 079 y 051; SCFI-2001, respectivamente); mientras que para determinar sulfatos se aplicó la norma oficial mexicana (DOF, 2010).

Procesamiento de los datos obtenidos en campo (pruebas de bombeo)

Para el procesamiento de los datos se utilizó el *software* especializado Acuífer Test (versión 4.2), diseñado para analizar datos de pruebas de bombeo y calcular las propiedades hidráulicas del acuífero. Algunos autores resaltan la importancia de la obtención de los parámetros hidráulicos del acuífero para definir su explotación racional (Gómez, Vives, Rodríguez & Cota, 2012; López *et al.*, 2015). El método utilizado para el análisis del acuífero en la zona de estudio fue el de Boulton, con apoyo en el método de cálculo que usó Villanueva & Iglesias (1984), ya que este considera en su criterio un rendimiento retardado en el acuífero, mismo que se pudo corroborar en campo durante la toma de datos, con los abatimientos despreciables de milímetros en los pozos de observación.

Cálculo del balance hidrológico

Para determinar el balance hidrológico se tomaron en cuenta los datos promedio mensuales de precipitación y evaporación de la estación Chupaderos del Indio (19165). Debido a la ubicación de la estación, esta se tomó como base para el cálculo de la evapotranspiración, utilizando el método de Turc (Custodio & Llamas, 2001); también se emplearon las ecuaciones 1, 2 y 3 que se muestran a continuación. Además, se realizó la corroboración con el método de Blaney & Criddle, ya que es un método utilizado de forma eficaz para zonas áridas como es el caso en estudio (Navejas-Jiménez, Nieto-Garibay, Fraga-Palomino, Rueda-Puente & Ávila-Serrano, 2011) (Ecuaciones 1, 2 y 3).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (1)$$

$$L = 300 + 25 * t + 0.05 * t^3 \quad (2)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (mm/año).

P = Precipitación (mm/año).

t = Temperatura media anual (°C).

L = Coeficiente por temperatura (°C).

$$ETR = p * (0.46 * T + 8.13) \quad (3)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración anual (mm)

$p = 100 * (\text{número de horas luz al día} / \text{número de horas luz al año}).$

T = temperatura media anual (°C).

Una vez obtenidos estos valores, se aplicó la ecuación de balance hidrológico, considerando que las entradas son igual que las salidas.

Resultados y Discusión

Para conocer el comportamiento geohidrodinámico de un acuífero se requiere conocer distintos parámetros, tales como los elementos que definan su geometría, la geología del mismo, las condiciones climáticas, así como el tipo de obras hidráulicas subterráneas que se tienen para su explotación (Dewandel, Jeanpert, Ladouche, Join & Maréchal, 2017; Lachaal *et al.*, 2011; Zammouri & Ribeiro, 2017). Con esta información se analizó el comportamiento geohidrodinámico de la Unidad hidrogeológica 1.

Censo de aprovechamiento y piezometría

A partir de la recopilación de datos que se realizó entre los meses de julio y agosto del 2015 se obtuvieron los niveles estáticos en los 36 pozos censados (tabla 3). A partir de ellos se obtuvo la dirección de flujo subterráneo con una orientación suroeste a noreste, siguiendo la misma dirección del río Pesquería. Es de suma importancia mencionar que la adquisición de los datos se realizó a finales de la época de estiaje. De la misma forma, la dirección de flujo coincide con la topografía de la zona de estudio, donde la localidad de Rinconada se encuentra en la zona de recarga (altitud promedio de 900 m s.n.m.) y la parte baja en la zona de descarga se ubica sobre Av. Lincoln (altitud promedio de 600 m s.n.m.), como se muestra en la figura 4. Esta concordancia entre la dirección de ambos flujos es consistente con otros reportes (Abotalib, Sultan & Elkadiri, 2016; Peiyue, Song, Ningning & Gang, 2014) donde demuestran que la dirección de flujo en el subálveo corre paralelo al río de forma natural; esta condición vuelve vulnerable a la contaminación a esta zona, principalmente por la presencia de actividad industrial.

Balance hidrológico

El balance hidrológico es de suma importancia para conocer la recarga natural del ciclo hidrológico, así como para determinar los volúmenes de almacenamiento en los acuíferos (Chávez-Guillén, 1977). Las bases de datos que se utilizaron en los cálculos de este trabajo fueron obtenidas de la Conagua (2009). Los resultados que se presentan en la figura 5 muestran que los volúmenes de recarga fueron igual a cero en todo el periodo analizado; estos son representativos de una zona árida (Anwar, 2015). Esto se debe a que en la zona de estudio no hubo una precipitación considerable que permitiera una acumulación de reserva. De lo anterior se infiere que para el periodo 1982-2013 no existió una recarga al acuífero, por lo que la relación que establece la fórmula de balance hidrológico ayuda a determinar que el volumen que se precipita es igual al volumen que se evapora.

Distintos autores consideran importante el balance hidrológico para establecer las condiciones de explotación de un acuífero, siendo la recarga un factor vital para una mejor gestión del recurso hídrico (Anwar, 2015; Chávez-Guillén, 1977; Gómez *et al.*, 2012). En este caso de estudio puede apreciarse que, debido a las condiciones de aridez, la recarga nula del acuífero (0 mm/año) ocasiona que este dependa completamente del flujo subterráneo regional, como son el aporte de cuencas aledañas y unidades hidrogeológicas interconectadas.

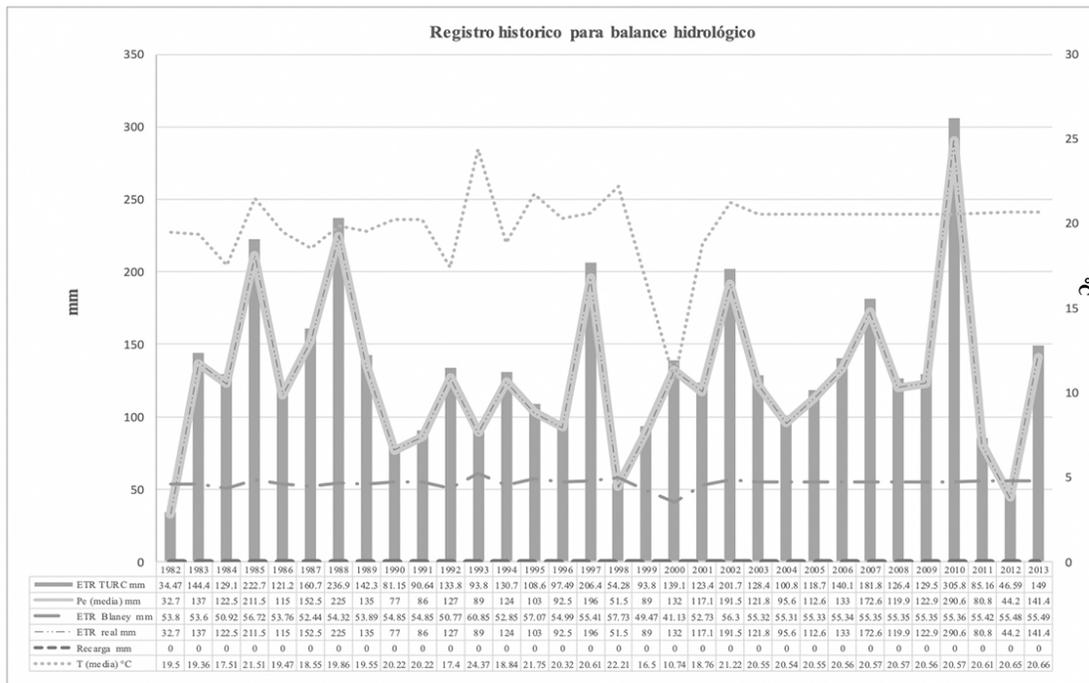
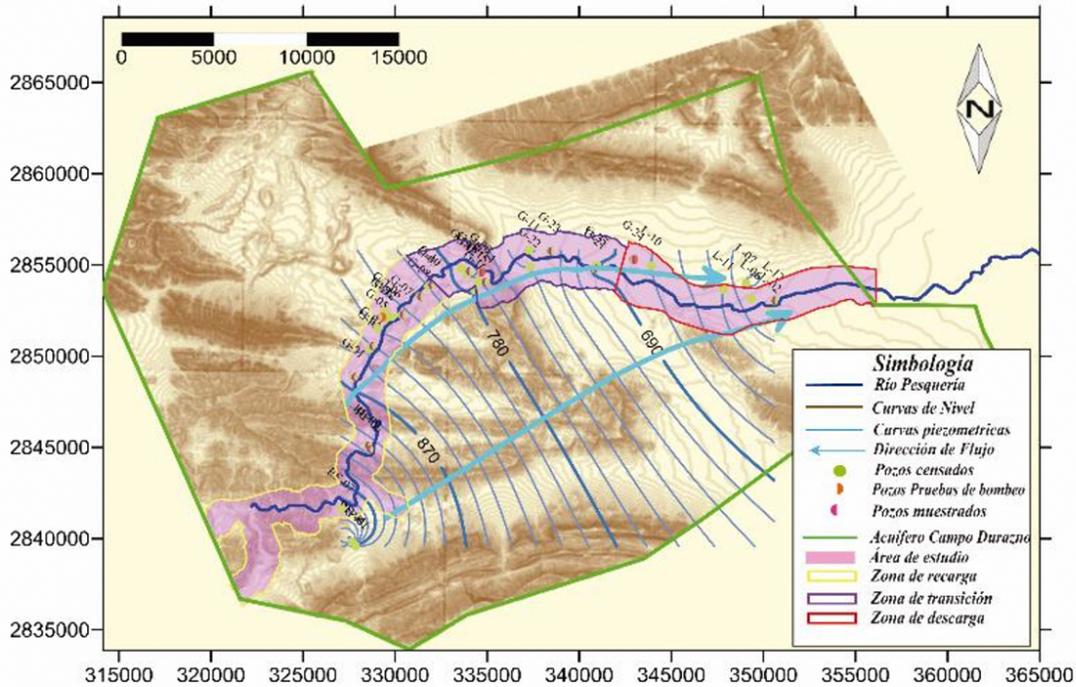


Figura 4. Gráfico de Registro histórico para la determinación del balance hidrológico (mm/año).
Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento hidráulico

Según Aponte-Reyes (2014) para hacer una validación del comportamiento hidráulico, se requiere tener comportamientos similares durante las pruebas de bombeo. Las tres pruebas de bombeo aplicadas en este trabajo se realizaron en condiciones no controladas. Esto se debió a que hubo restricciones como su corta duración (3 h como máximo para el abatimiento y 1.5 h para su recuperación), obteniendo un nivel de estabilización en el momento de la ejecución. Se obtuvo un caudal constante de 2 litros por segundo (L/s) en dos pruebas y 4 L/s en la prueba con mayor capacidad, variando únicamente la duración, según el tiempo de estabilización del nivel dinámico. De acuerdo con Morales-Casique *et al.* (2015), se hizo la selección de los pozos en este estudio considerando el área de mayor densidad de los aprovechamientos, así como las zonas de recarga y descarga de la cuenca (figura 5).



Fuente: INEGI 2015 Construyo: Lilia E. Arriaga

Figura 5. Localización de puntos de muestreo y piezometría en el acuífero Campo.
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2015).

A partir de los parámetros obtenidos por medio del *software* *Acuífer Test* (versión 4.2) se observó que los pozos tienen un comportamiento similar con respecto a la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y la conductividad hidráulica (tabla 4). Esto permite corroborar que se trata de un medio fracturado con interconexión con un medio poroso, como lo indica la geología de la zona.

Tabla 4. Resultados obtenidos en pruebas de bombeo en pozos seleccionados.

Pozo	Coordenadas UTM			Q (L/s)	N.E. (msnm)	N.D. (msnm)	Tiempo de abatimiento (min)	Tiempo de recuperación (min)	T (m ² /día)	K (m/día)
	X	Y	Z							
G-26	32919 3	285213 7	837	2	810.5	810	60	60	8.64x10 ¹	1.73
G-20	33466 1	285459 7	782	4	765	760.7	120	ND	8.64x10 ¹	1.73
G-24	32929 3	285213 7	837	2	820.7	788.2	60	60	8.64x10 ¹	1.73

N.E.: Nivel estático, N.D.: Nivel dinámico, ND: no determinado.
Fuente: Elaboración propia.

Debido a la restricción de permisos para la ejecución de las pruebas, los resultados mostrados en la tabla 4 son representativos de las tres diferentes zonas; recarga (clave G-26), transición (clave G-20) y descarga (clave G-24). En los modelos matemáticos empleados para la obtención de parámetros hidráulicos tales como la transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) en acuíferos libres en medios granulares,

algunos autores utilizan la fórmula de Theis (López *et al.*, 2015). Sin embargo, como el acuífero en estudio se encuentra en un medio fracturado principalmente, se hizo una adecuación empleando la ecuación de Boulton (Custodio & Llamas, 2001). Los tiempos para realizar las pruebas de bombeo fueron de corta duración, debido a que el acuífero se estabilizó con los equipos existentes *in situ*. Por lo tanto, los valores obtenidos en estas pruebas indican que, para las tres zonas de análisis (recarga, transición y descarga) puede considerarse un comportamiento homogéneo del acuífero, confirmando que existe una alta transmisividad (Todd & Larry, 2005). Debe destacarse en estos resultados que la estructura geológica en la zona de estudio influye en los patrones de la dirección principal del flujo subterráneo, que coincide con la trayectoria del río Pesquería.

Presencia de fuentes que afectan potencialmente la calidad del agua

Según la descripción realizada para el acuífero 1909, actualmente existe una expansión urbana del área metropolitana de Monterrey, que contribuye al aumento de la actividad industrial en el área de estudio (Conagua, 2009). Gómez (2016) resalta la importancia de la localización de las fuentes de contaminación para definir su transporte en los acuíferos. En la zona de estudio se levantó un censo de posibles fuentes de contaminación que podrían afectar al acuífero (tabla 5). En estas fuentes se identificó el tipo de actividades antropogénicas que se realizan y si actualmente éstas se encuentran activas. Todo esto se obtuvo de información oficial (INEGI, 2015) efectuando la corroboración durante recorridos de campo, en los que se realizó una localización espacial en los sitios o posibles focos contaminantes del área (figura 6).

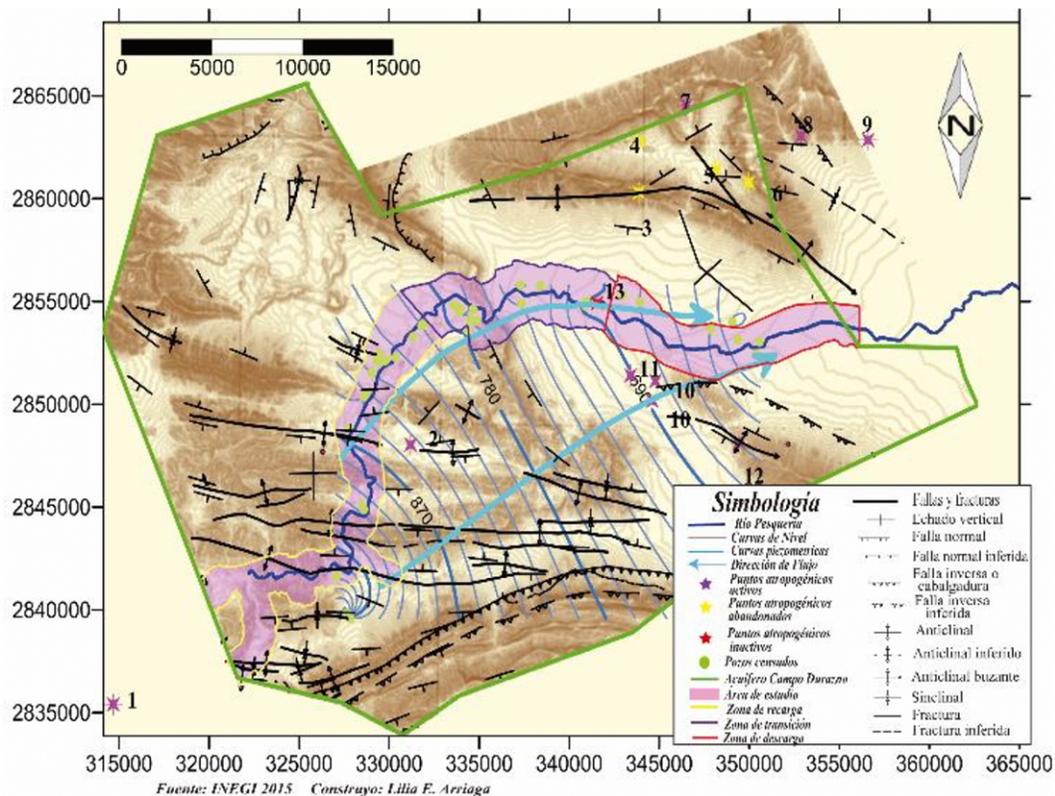


Figura 6. Localización de sitios con actividad antropogénica en el acuífero Campo Durazno.
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2015).

Tabla 5. Identificación de actividades antropogénicas en la zona de estudio.

Funcionamiento	Empresa	Actividad
1 Activo	Cementera Apasco	Fabricación de cemento
2 Activo	Cantera	Explotación de travertinos
3 Abandonada	Mina “La Blanca”	Explotación de plomo y zinc
4 Abandonada	Mina “El Diapiro”	Explotación de yesos
5 Abandonada	Mina “San Juan “	Explotación de plomo y zinc
6 Abandonada	Mina “La Reja”	Explotación de plomo, zinc y cobre
7 Activo	Mina “Regio Cal”	Explotación de dolomita
8 Activo	Campos de salmuera de Álcali	Explotación de sales alcalinas
9 Activo		
10 Activo	Industria del Álcali – Vitro (plantas)	Planta de productos químicos inorgánicos alcalinos
11 Activo	Solvay Química y minera (planta)	Carbonato de sodio, sulfato de estroncio, bicarbonato y bicarbonato de sodio
12 Activo	Industria de caliza	Planta de explotación de calizas
13 Inactivo	Planta tratadora de aguas negras	Lagunas de tratamiento primario

Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de los sitios identificados con actividad antropogénica se localizan aguas abajo, en la zona descrita como zona de descarga (figura 6). Por tal motivo, la presencia de los sistemas de fallas y fracturamiento que se observan permiten interpretar que estos facilitan la movilización de contaminantes en la misma dirección (Owen & Cox, 2015). Esto puede asociarse con el tipo de movimiento que se presenta en la zona de descarga, ya que es consistente en su fase granular, facilitando así la migración del escurrimiento subterráneo, pero también la posible entrada de contaminantes. Además, la alta conductividad hidráulica calculada a partir de la información de las pruebas de bombeo coincide con esta interpretación, así como con otros autores quienes mencionan que la infiltración se puede presentar más fácilmente en zonas de explotación a lo largo de la margen de un río (Shanafield & Cook, 2014). Dado lo anterior, los resultados indican que la unidad hidrogeológica 1 presenta un riesgo de contaminación, debido a las actividades antropogénicas y la continua explotación de sus pozos para satisfacer las necesidades de los ejidos que de ahí se abastecen.

Análisis geofísico

La configuración de la estructura geológica está soportada por métodos geoelectrónicos, tal como se realizó en trabajos similares (Perrone, Lapenna & Piscitelli, 2014; Sonkamble, 2014). Para determinar la interacción entre la unidad hidrogeológica 1 y el río Pesquería se realizaron perfiles geoelectrónicos a lo largo de este último por medio de los arreglos dipolo-dipolo para determinar la continuidad entre la ribera del río y el nivel freático (figura 3). Con apoyo en el marco geológico-estructural se identificaron los diferentes estratos y fallas presentes en todos los perfiles geoelectrónicos, de acuerdo con la metodología propuesta por Crosbie, Taylor, Davis, Lamontagne & Munday (2014). En este trabajo se seleccionaron los sondeos con información más representativa para definir las tres zonas en las que se dividió el área de estudio: el área de recarga, el área de transición y el área de descarga (figura 7).

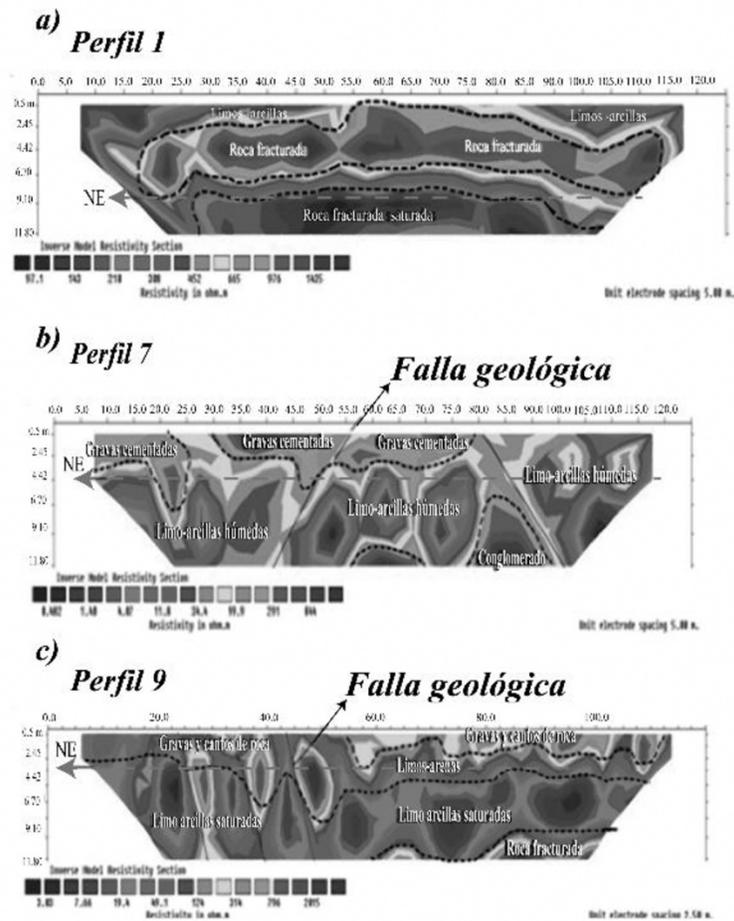


Figura 7. Perfiles geoelectricos: a) Área de recarga, b) Área de transición y c) Área de descarga.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7a se observa el perfil 1 que corresponde al área de recarga. Existe en el centro de la zona una alta resistividad de 1425 Ohm.m indicando la presencia de rocas fracturadas rodeadas por resistividades bajas 37.1 Ohm.m, que corresponden a la presencia de limos y arcillas. Asimismo, se detectó la presencia del nivel freático en las rocas a una profundidad de 8.5 m, lo que concuerda con los niveles estáticos de pozos cercanos al lecho del río. En el perfil 7 (figura 7b) se representa el área de transición, en el que se aprecia el cambio de un medio fracturado (en el área de recarga) a un medio granular cementado, que se encuentra sobre una capa de limos y arcillas. Este medio favorece el movimiento del agua subterránea a través del estrato granular y los sistemas de fallas a una profundidad de 3 m. En el perfil 9 (figura 7c) se localiza el área de descarga, en esta se observa la interacción río-acuífero, ya que el río transporta agua de forma perenne. La baja resistividad de 3.03 Ohm.m indica una litología compuesta por gravas y cantos rodados, junto con arenas y limos; esta ocasiona que el flujo subterráneo varíe debido a su interacción con el río (Kumar *et al.*, 2014). Lo anterior se debe a que puede comportarse como influente o efluente, dependiendo de las condiciones de explotación que se tengan en el acuífero, así como las condiciones climatológicas (periodo de estiaje o de lluvias). En la zona de estudio se comporta como influente en periodo de lluvia y como efluente en tiempo de estiaje. Lo anterior se presenta sin tener un régimen de explotación en el acuífero libre, aunque cambia el sistema a efluente cuando el acuífero es sometido a regímenes de explotación intensos, acorde con las actividades agrícolas del ejido que ahí se

localiza. Además, el nivel freático tiene una profundidad de 2.41 m, lo que lo vuelve muy susceptible a los cambios de nivel que experimenta el río Pesquería. De igual forma, los resultados obtenidos permiten confirmar por medio de los perfiles geoelectrónicos, que el acuífero se encuentra en su zona de recarga en medios fracturados, con una transición hacia medios granulares, teniendo una nueva interconexión granular hacia su zona de descarga.

Calidad del agua

De acuerdo con el método descrito en la parte experimental se analizaron 16 muestras: 13 de ellas fueron extraídas de fuentes de abastecimiento y 3 fueron tomadas en agua superficial, como se indica en la tabla 6. Solo en el punto G-18 se superó el límite máximo permisible (LMP) para agua potable con respecto al pH (*Environmental Protection Agency* [EPA], 2000). La conductividad eléctrica (C.E.) varía entre 789 y 2680 $\mu\text{S}/\text{cm}$; el 81.25% de las muestras superó el MLP según la EPA (2000), mientras que el 12.5% superó el LMP establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). El 56.25% de los puntos superó el LMP para la presencia de Ca^+ , según la EPA (2000) y la norma nacional (Secretaría de Salud [SSA], 2000). El 100% de las muestras superó el LMP establecido por las tres normas consultadas para la presencia de Na^+ (EPA, 2000; SSA, 2000; OMS, 2006). El 31.25% de las muestras superó el LMP para Mg^{2+} según la norma mexicana (SSA, 2000). Con respecto a los Cl^- , el 12.5% superó el LMP según las tres normas (EPA, 2000; SSA, 2000; OMS, 2006). Mientras que la presencia de SO_4^{2-} superó el LMP en el 94% de los puntos muestreados según la EPA (2000), mientras que solo el 81.25% superó el LMP según la norma mexicana y la Organización Mundial de la Salud (SSA, 2000; OMS, 2006). Con respecto a la presencia de Zn^{2+} , este superó el LMP según la OMS (2006) en un punto.

De lo anterior, puede interpretarse que los parámetros físicos como pH y C.E. excedieron los MLP (EPA, 2000) en las tres zonas del acuífero. La concentración de Ca^+ se encontró elevada en casi todos los puntos de muestreo, excepto en un punto en la zona de recarga (G10), en dos puntos en la zona de transición (G18 y G14) y en un punto en la zona de descarga (L12), así como sobre el cauce del río Pesquería (RIO 1 y RIO 2). Al contrario, el Mg^{2+} solo excedió los LMP en un pozo en la zona de recarga (G07) y en un pozo en la zona de transición (G23). Además, la zona de recarga superó los LMP en dos puntos (G21 y G24) y sobre el cauce del río (RIO 2). No se encontraron concentraciones superiores a los LMP de Cl^- en la zona de recarga, mientras que en la zona de transición y de descarga sólo se encontró en un punto y sobre el río (G21 y RIO 3), respectivamente. Las concentraciones de SO_4^{2-} excedieron los LMP en casi todos los puntos de muestreo, excepto en el G18, localizado en la zona de transición. Por último, el Zn^{2+} solo se encontró superior al LMP (OMS, 2006) en un punto localizado en la zona de descarga (G21).

La distribución de los parámetros físico-químicos detectados en concentraciones superiores a los LMP, que establecen normas nacionales e internacionales en materia de calidad del agua para consumo humano, permite observar una interacción con la litología del acuífero a través de las zonas de recarga, transición y descarga. Esta interacción también puede atribuirse a la presencia de actividad humana de origen industrial, ya que en algunos sitios de muestreo se detectó que existen descargas de origen industrial hacia el río Pesquería. Además, la poca profundidad del acuífero, así como su gradiente hidráulico (unidad hidrogeológica 1), parecen favorecer la migración de contaminantes desde la zona de recarga hacia la zona de descarga, así como desde la superficie. Por otra parte, el río Pesquería se comporta como una corriente perenne, que sufre tanto el fenómeno de influencia como de efluencia, dependiendo si la época del año es de estiaje o lluviosa. Aunque se puede suponer que existe un intemperismo químico natural de las rocas, no debe descartarse que las actividades industriales, particularmente en los campos de salmueras y minas de yesos (ubicadas en la zona de transición), contribuyen con la presencia de concentraciones elevadas de iones como Cl^- , Na^+ y SO_4^{2-} , principalmente, así como en los sitios donde se explotan Plomo y Zinc, que podrían ser la fuente de aportación de Zn^{2+} disuelto en el agua.

Por otro lado, en la figura 8 se presenta el diagrama de Piper, donde se observa la evolución del agua a través de la zona de estudio. Este indica que, en su mayoría, es un agua mixta cálcico-sulfatada, perteneciente a un flujo regional (Alaa & Ian, 2016).

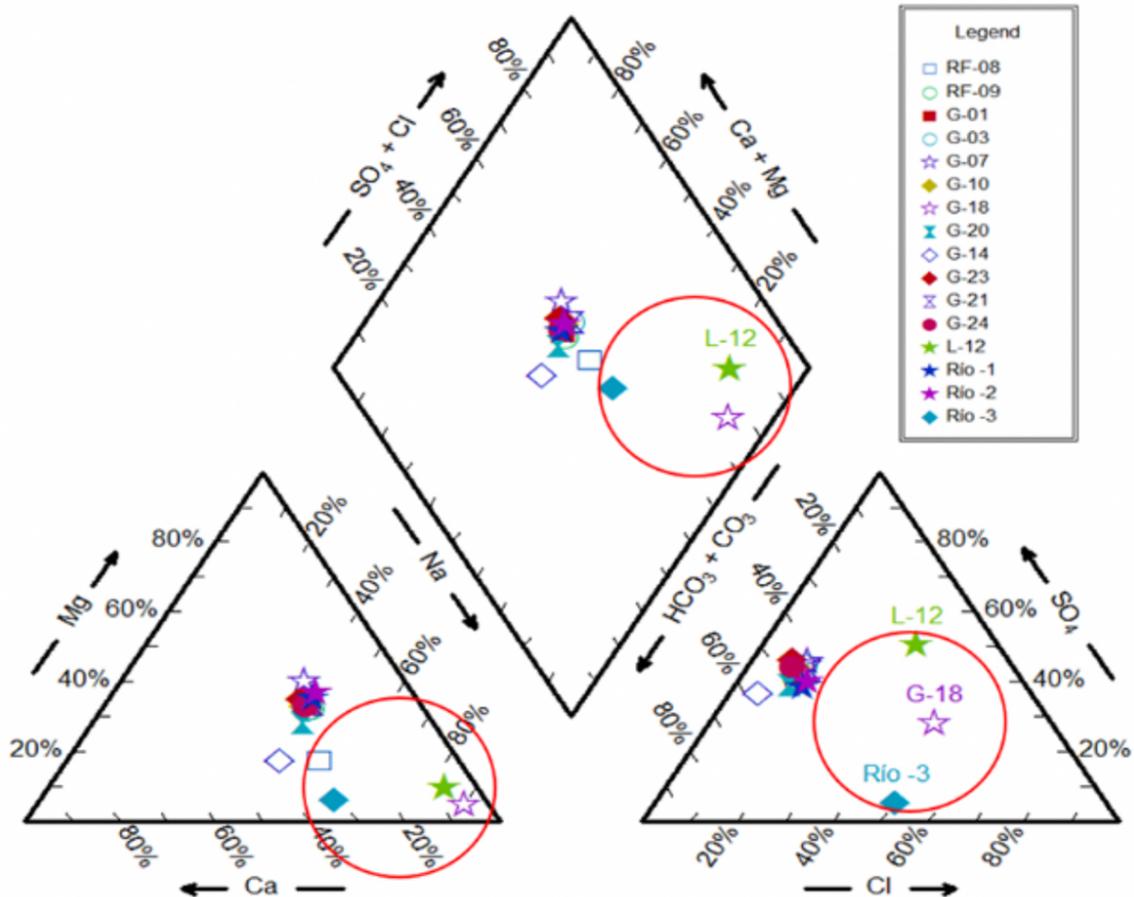


Figura 8. Clasificación del tipo de agua en el acuífero Campo Durazno, según el diagrama de Piper.
Fuente: Elaboración propia.

En la zona de recarga, la presencia de areniscas y lodolitas provocan que el Na^+ y SO_4^{2-} se encuentren en forma nativa. Esta composición química va evolucionando hacia la zona de transición, ya que el medio geológico favorece una sobresaturación. Esta sobresaturación pudo provocar la precipitación de iones (Ca^+ , Cl^- y Mg^{2+}). En esta parte del área de estudio se localizan sitios con actividad antropogénica, como se indicó en la tabla 6. Algunas de ellas, como los campos de salmueras de Álcali, producen NaCl . Estos se localizan cerca del río Pesquería, en donde también se aprecia un aumento de iones tales como Cl^- . Esta migración iónica tiende a aumentar en el agua superficial, ya que hacia la zona de descarga se observó un patrón de difusión (Vincy, Brilliant & Pradeepkumar, 2015). Esto se debió al aumento de los iones de Na , que varían desde bajos en la zona de transición y se elevan drásticamente hacia la zona de descarga.

Tabla 6. Análisis fisicoquímicos de 16 puntos de muestreo en el área de estudio.

	MUESTRA	pH	Conductividad mS/cm	Alcalinidad Naranja mg/L	Ca ⁺ mg/L	Mg ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	HCO ₃ ⁻ mg/L	CO ₃ ²⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻ mg/L	N mg/L	Zn ²⁺ mg/L
Zona de Recarga	RF-08	7.35	2480	225	640	232	1342	1280	0.072	193.8	900	2	0.03
	CONAZA	8.29	2040	178	540	448	1180	1080	0.085	162	762	1.2	0.87
	G-01	7.21	1803	245	446	382	961	892	0.103	124	570	0.4	0.015
	G-03	7.11	2180	221	576	444	1165	1152	0.08	166.2	825	2.1	0.1
	G-07	7.14	2230	212	548	640	1177	1096	0.084	162.2	838	2.1	0.015
Zona de Transición	G-10	7.28	1822	196	484	396	972	968	0.095	126.6	688	2.4	0.01
	G-18	8.1	789	316	20	12	435	40	2.3	48.8	39	0.4	0.006
	G-20	7.55	1909	205	560	348	1047	1120	0.082	146.4	675	2.8	0.014
	G-14	7.34	925	192	360	100	496	720	0.128	43.5	338	2.5	0.825
	G-23	7.54	2380	245	656	568	1267	1312	0.07	138.5	1025	2.1	0.06
Zona de Descarga	G-21	7.69	3290	266	792	704	1779	1584	0.058	296.7	1225	1.8	3.23
	G-24	7.78	2680	266	704	584	1437	1408	0.065	171.4	1050	2.6	0.01
	L-11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	L-12	7.28	1208	205	60	52	864	120	0.411	125.3	263	0.4	0.006
	RIO 1	7.27	1810	184	432	428	981	864	0.053	143.7	520	2.4	0.005
Límites permisibles (MLP)(LMP)	RIO 2	7.42	2080	171	456	508	1111	912	0.048	167.5	610	0.4	0.005
	RIO 3	7.32	10850	85	2825	325	6316	5650	0.015	3577	500	2.7	0.017
	OMS 2006	ND	2500	ND	ND	ND	200	ND	ND	250	250	ND	0.5
SSA 2000	6.5-8.5	ND	ND	500	500	200	ND	ND	250	250	ND	0.5	
EPA 2000	6.5-8.5	1500	ND	ND	ND	200	ND	ND	250	250	ND	0.5	

Fuente: Elaborado propia.

Comportamiento de la geohidrodinámica del acuífero

A partir de los resultados y análisis anteriores, fue posible explicar la geohidrodinámica de la unidad hidrogeológica 1, como se presenta a continuación.

El área de estudio presenta una recarga superficial nula hacia el acuífero (0 mm/año). Esto provoca una dependencia total de la aportación que recibe desde las unidades hidrogeológicas, interconectadas por medio del sistema de fracturas regional y de poros, hacia su parte más superficial. Como se estimó a través de las pruebas de bombeo, el tiempo de abatimiento del acuífero fue muy similar al tiempo de recuperación, por lo que puede suponerse que el acuífero presenta un equilibrio que debe buscar mantenerse mediante la propuesta de un plan eficiente para la explotación sostenible del acuífero (Van, Thanh, Hiep & Hida, 2014).

En cuanto a la calidad del agua subterránea, se observó que existen parámetros físicos (pH, C.E.) y químicos (Ca⁺, Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Zn²⁺) que superaron los límites máximos permisibles nacionales e internacionales para consumo humano. Particularmente, puede suponerse que en la zona de recarga (acuífero semiconfinado, fracturado) la presencia de algunos iones en concentraciones elevadas se debe principalmente al intemperismo químico natural de las rocas, mientras que hacia las zonas de transición y descarga (acuífero libre, interconexión entre fracturas y poros) se observa la influencia de algunas actividades antropogénicas, especialmente donde el nivel del agua subterránea es somera o se encuentra en continuo intercambio con el río Pesquería (figura 6).

La transmisividad y conductividad hidráulica de la unidad hidrogeológica 1 pueden favorecer tanto su recarga como su contaminación. Por lo tanto, es recomendable considerar su geohidrodinámica para establecer las medidas necesarias para su protección ambiental y preservación de su equilibrio hidrológico.

Conclusiones

En este trabajo se determinó el comportamiento geohidrodinámico de la unidad hidrogeológica 1 en el acuífero Campo Durazno (clave 1909). Esta unidad comprende una relación entre un acuífero semiconfinado compuesto por un medio geológico fracturado (zona de recarga), que se interconecta con un medio poroso (zona de transición) hacia un acuífero libre comprendido por poros que interactúan con el río Pesquería (zona de descarga). Las tres zonas presentaron un comportamiento hidráulico similar (conductividad hidráulica, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, gasto), como lo demostraron los resultados de las pruebas de bombeo.

La configuración geológica-estructural de la zona ocasiona que en la unidad hidrogeológica 1 el flujo subterráneo esté controlado por un sistema de fallas y fracturas, que lo conducen desde las zonas de recarga y transición hacia el cauce del río Pesquería. En la zona de descarga, la predominancia de un medio geológico compuesto por poros también favorece, junto con la topografía del terreno, el transporte del escurrimiento subterráneo hacia el río. Dado que el nivel del agua subterránea en esta última zona es somero, existe una fluctuación del fenómeno de influencia y efluencia entre el acuífero y el río. Esta fluctuación, en combinación con los cambios estacionales del clima y las actividades industriales, contribuyen a una afectación de la calidad del agua subterránea y el río Pesquería. Lo anterior se determinó con la presencia de iones en concentraciones superiores a los LMP (Na^+ , Ca^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Zn^{2+} y SO_4^{2-}) en los distintos puntos analizados. Se asume entonces que hay una posible migración de la contaminación. Esta ocurre particularmente desde la zona de transición y de descarga, así como sobre el río Pesquería, en la dirección de los escurrimientos superficial y subterráneo hacia la zona urbanizada de García, Nuevo León, donde son la principal fuente de abastecimiento a la población.

Se recomienda la implementación a corto plazo de un plan de gestión ambiental, que permita preservar y controlar la calidad del agua, así como su recarga natural, ya que se prevé un incremento en su explotación debido al acercamiento de la zona metropolitana de Monterrey y el aumento de sus necesidades de fuentes de abastecimiento para fines potables, principalmente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los revisores de este trabajo, sus acertados comentarios que contribuyeron a mejorar su contenido para la mejora de esta publicación.

Lilia Evangelina Arriaga Díaz de León agradece al Consorcio de Universidades Mexicanas (Cumex) por su programa doctoral al igual que a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por su apoyo en el programa doctoral y en el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Abotalib, A. Z., Sultan, M., & Elkadiri, R. (2016). Groundwater processes in Saharan Africa: Implications for landscape evolution in arid environments. *Earth-Science Reviews*, 156, 108-136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.004>
- Alaa, A., & Ian, C. (2016). Groundwater flow and geochemical evolution in the Central Flinders Ranges, South Australia. *Science of the Total Environment*, 572, 837-851. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.123>
- Brkić, Ž., Briški, M., & Marković, T. (2016). Use of hydrochemistry and isotopes for improving the knowledge, of groundwater flow in a semiconfined aquifer system of the Eastern Slavonia (Croatia) *CATENA*, 142, 153-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.010>

- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo-Rivera, J. J., & Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n3a5>
- Anwar, A. A. (2015). Hydrochemical Characteristics of Egypt western desert oases groundwater. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7551-7564.
- Aponte-Reyes, A. (2014). Validación de modelos hidrodinámicos de tres modelos topológicos de lagunas facultativas secundarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*, XV(4), 637 - 654.
- Castegna, A., Cavallini, A., Lippolis, C., Vacca, M., Nardelli, C., Arnesano, F., Carella, N., & Depalo, R. (2016). *Primer sequences of target genes*, Figshare. doi: 10.1371/journal.pone.0152181.t001
- Chávez-Guillén, R. (1977). El agua subterránea en relación con los fenómenos que integran el ciclo hidrológico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XXXVIII(1), 29-39. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1977v38n1a3>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2000). *NMX-AA-093-SCFI-2000. Análisis de agua-Determinación de la conductividad electrolítica. Método de prueba*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2009). *Actualización de CAMPO DURAZNO*. México: Conagua, 2009.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua). (2014). *Noviembre de 2014*. Recuperado el 25 de enero de 2015 <http://www.conagua.gob.mx/>
- Crosbie, R. S., Taylor, A. R., Davis, A. C., Lamontagne, S., & Munday, T. (2014). Evaluation of infiltration from losing-disconnected rivers using a geophysical characterisation of the riverbed and a simplified infiltration model. *Journal of Hydrology* 508, 102–113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.045>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea*. España: Ediciones Omega.
- Dewandel, B., Jeanpert, J., Ladouche, B., Join, J. L., & Maréchal, J. C. (2017). Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. *Journal of Hydrology*, 50, 118-129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2010). *PROY-NMX-AA-074-SCFI-2010. Análisis de agua, medición del ion sulfato, en aguas naturales, potables y residuales-Método de prueba*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5144537&fecha=28/05/2010
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2013). *Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-014-SSA1-1993, Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua, públicos y privados*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4691189&fecha=27/04/1994
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2014). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5339732&fecha=08/04/2014
- Environmental Protection Agency (EPA). (2000). *National Water Quality Inventory*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/2000_national_water_quality_inventory_report_to_congress.pdf
- Gómez, A., Vives, L., Rodríguez, L., & Cota, S. D. S (2012). Importancia de la formulación del régimen temporal de flujo en el modelo numérico del Sistema Acuífero Guaraní. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3); 267-280 ISSN:0366-017, EISSN 2253-667
- Gómez, M. L. (2016). Estimación de parámetros de transporte y mecanismos que gobiernan su respuesta a la contaminación caso de estudio de un acuífero poroso clástico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(2), 339-356. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2016v68n2a11>
- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo-Rivera, J. J., & Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcánicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2012v64n3a5>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). *Anuario Estadístico y Geográfico de Nuevo León 2015*. México.
- Kim, H. P., Kim, J., Kim, B. S., Kim, H. M., Kim, J., Yusoff, A., Rashid, B. M., Jang, J., & Nazeeruddin, M. K. (2017); High - Efficiency, Blue, Green, and Near - Infrared Light - Emitting Diodes Based on Triple Cation Perovskite. *Advanced Optical Materials*, 5(7), 1600920. doi: <https://doi.org/10.1002/adom.201600920>
- Kumar R. A. (2015) *Optimization: algorithms and applications*. Boca Raton: CRC, Taylor & Francis Group
- Kumar, P., Avtar, R., Kumar, A., Kumar Singh, Ch., Tripathi, P., Kumar, G. S., & Ramanathan, A. L. (2014). Geophysical approach to delineate arsenic hot spots in the alluvial aquifers of Bhagalpur district, Bihar (India) in the central Gangetic plains. *Applied Water Science*, 4(2), 89–97.
- Lachaal, F., Bédir, M., Tarhouni, J., Gacha, A. B., & Leduc, C. (2011). Characterizing a complex aquifer system using geophysics, hydrodynamics and geochemistry: A new distribution of Miocene aquifers in the Zéramdine and Mahdia-Jébéniana blocks (east-central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*, 60(4), 222-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.03.003>
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Moran-Ramírez, J., Cardona Benavides, A., & Hernández García, G. (2013). Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 9-26. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2013v65n1a2>
- López Loera, H., Ramos Leal, J. A., Dávila Harris, P., Torres Gaytan, D. E., Martínez Ruiz, V. J., & Gogichaishvili, A. (2015). Geophysical Exploration of Fracture-Media Aquifers at the Mexican Mesa Central: Satellite City, San Luis Potosí, Mexico. *Survey's in Geophysics*, 36(1), 167-184.
- Macdonald, D., & Edmunds, W. M. (2014). Estimation of groundwater recharge in weathered basment aquifers southern Zimbabwe; a geochemical approach. *Applied Geochemistry*, 42, 86-100. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.01.003>
- Maliva, R. G., Herrmann, R., Coulibaly, K., & Guo, W. (2015). Advanced aquifer characterization for optimization of managed aquifer recharge. *Environmental Earth Sciences*; 73, 7759 – 7767. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3167-z>
- Martínez, M. (2012). *Variaciones en el comportamiento de las areniscas basales de la cuenca de la Popa y margen oriental de la cuenca de Parras, noreste de México*. (Tesis de maestría en Ciencias Geológicas). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Movahedian, A., Chitsazan, M., & Nozarpour, L. (2016) Management of an aquifer with an emphasis on the interaction of the aquifer and river using MODFLOW model in Gotvand–Aghili plain, Khuzestan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*; 8(2), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2121-z>
- Morales-Casique, E., Escolero, O., & Arce, J. L. (2015). Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo de pozos San Lorenzo Tezonco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 203-214. doi: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a5>
- National Environmental Methods Index (NEMI). (1998). *3500-Ca B. EDTA Titrimetric Method*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de https://www.nemi.gov/methods/method_summary/7402/
- Navejas-Jiménez, J., Nieto-Garibay, A., Fraga-Palomino, H. C., Rueda-Puente, E. O., & Ávila-Serrano, N. Y. (2011). Comparación de métodos para estimar la evapotranspiración en una zona árida citrícola del noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(2), 147- 155.
- Owen, D. D. R., & Cox, M. E. (2015). Hydrochemical evolution within a large alluvial groundwater resource overlying a shallow coal seam gas reservoir. *Science of the Total Environment*, 523, 233–252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.115>
- Peiyue, L., Song, H., Ningning, Y., & Gang, X. (2014) Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes in Yan'an City, northwest China: implications to sustainable groundwater quality management on the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 77(23). doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7968-3>
- Perrone, A., Lapenna, V., & Piscitelli, S. (2014). Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: A review. *Earth-Science Reviews*, 135, 65–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>

- Rugel, K., Larned, S. T., Gooseff, M. N., Packman, A. I., & Wondzell, S. M. (2015). Groundwater-surface-water interactions: Current research directions. *Freshwater Science*, 34(1), 92-98. doi: <https://doi.org/10.1086/679491>
- Secretaría de Desarrollo (2012) Plan Municipal de Desarrollo Urbano del Municipio de García, Nuevo León 2012-2015.pdf Recuperado el 7 de agosto de 2017 de <http://trans.garcia.gob.mx/admin/uploads/Plan%20Municipal%20de%20Desarrollo%20Urbano%20del%20Municipio%20de%20García,%20Nuevo%20León%202012-2015.pdf>
- Secretaría de Salud (SSA). (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Recuperado el 7 de agosto de 2017 de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Servicio Geológico Mexicano (2008) Carta Geológica-Minera Monterey G14-7 Recuperado el 7 de agosto de 2017 de https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/72_G14-7_GM.pdf
- Shanfield, M., & Cook, P. G. (2014). Transmission losses, infiltration and groundwater recharge through ephemeral and intermittent streambeds: A review of applied methods. *Journal of Hydrology* 511, 518–529. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.068>
- Sonkamble, S. (2014). Electrical resistivity and hydrochemical indicators distinguishing chemical characteristics of subsurface pollution at cuddalore cost, Tami Nadu. *Journal of Geological Society of India*, 83(5), 535-548.
- Todd, D. K., & Larry, W. M. (2005). *Groundwater Hydrology*. California: Wiley.
- Torres Muñiz, A. E. (2013). *Monitoreo de la comunidad de insectos para evaluar la calidad del agua, desde el Río Pesquería, desde el municipio de García hasta Pesquería. Nuevo León, México* (Tesis de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Colaboremos por la salud*. Recuperado el 1º de agosto de 2017 de https://www.who.int/whr/2006/whr06_es.pdf
- Van Giang, N., Thanh, L. N., Hiep, V. Q., & Hida, N. (2014). Hydrological and hydrogeological characterization of groundwater and river water in the North Hanoi industrial area, Vietnam. *Environmental Earth Sciences*, 71(11), 4915–4924.
- Vega-Vera, F. J., Mitre-Salazar, L. M., & Martínez-Hernández, E. (1989). Contribución al conocimiento de la estratigrafía del G Difunta (Cretácico superior-terciario) en el noreste del México. *Revista de Ciencias Geológicas*, 8(2), 179-187.
- Villanueva Martínez, M., & Iglesias López, A. (1984). *Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Vincy, M. V., Brilliant, R., & Pradeepkumar, A. P. (2015). Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater for drinking and irrigation purposes: a case study of Meenachil River Basin, Western Ghats, Kerala, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, 4217, 1-19. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4217-4>
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: agua para un mundo sostenible: datos y cifras*. Colombella, Perusa, Italia.
- Zammouri, M., & Ribeiro, L. (2017). Analyzing the effect of transmissivity uncertainty on the reliability of a model of the northwestern Sahara aquifer system. *Journal of African Earth Sciences*, 129, 910-922. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.02.034>