

Interacciones entre agua subterránea y agua superficial: análisis del hidrograma del río Querétaro

Iris Neri-Flores¹, Raúl Francisco Pineda-López², Juan Alfredo Hernández-Guerrero³

¹irisneri@gmail.com; ²rufuspinedal@gmail.com; ³juan.hernandez@uaq.mx

^{1,2,3} Maestría en Gestión Integrada de Cuencas

Universidad Autónoma de Querétaro; Querétaro, México

Resumen

Los mecanismos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas son complejos y afectan los procesos de recarga y descarga. El objetivo de este estudio es identificar el caudal base del río Querétaro con base en el análisis de datos hidrométricos durante el periodo 1962-2014. La zona de estudio se restringe a la subcuenca del río Querétaro y al acuífero Valle de Querétaro, donde se localiza la estación hidrométrica 12558 (El Batán). Para la separación del caudal base, se aplicó un filtro digital y se consideraron los datos de elevación del nivel estático de las redes piezométricas. Los resultados muestran que el caudal base presenta una variación temporal. En este trabajo se calculó que el caudal base aporta al río 10.5 Mm³/año (para 1962-1988) y 7.1 Mm³/año (para el periodo 1989-2014), lo que indica que hay una tendencia a la disminución de caudal base. En el Valle de Querétaro, existe una importante demanda poblacional y actualmente se tiene que perforar en promedio 107 m para alcanzar el nivel estático del acuífero. Entender el funcionamiento de la interacción agua superficial-agua subterránea será la base para una mejor gestión del agua.

Palabras clave: interacciones río-acuífero, caudal base, hidrometría, piezometría

Abstract

The mechanisms of interaction between aquifers and watersheds are complex and affect the recharge and discharge processes. The objective of this study is to identify the base flow of Queretaro River based on the hydrometric data for the period 1962-2014. The study zone is in Queretaro River subbasin and the Queretaro's valley aquifer, where the gauge station 12558 (El Batán) is localized. In order to separate the base flow, a digital filter was applied and the data of groundwater elevation levels of the piezometric network were considered. The results show that base flow has a temporal variation. It was estimated that the base flow contributes 10.5 Mm³/year (for 1962-1988) and 7.1 Mm³/year (for 1962-2014). This indicates a decrease of runoff and the river depends on the aquifer. There is a strong population demand in Queretaro Valley, so the water resource will be more necessary; currently, the drilling to find water is 107 m average. Understanding the groundwater-surface water interactions will set the foundations for a better water management.

Keywords: river-aquifer interactions, base flow, hydrometric, piezometric

Artículo arbitrado

Recibido:

10 de abril de 2019

Aceptado:

16 de julio de 2019

Introducción

Los mecanismos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas son complejos y afectan los procesos de recarga y descarga; estas interacciones tienen importancia ecológica y la actividad humana puede afectarlas (Sophocleus, 2002). Las interacciones de ríos con el agua subterránea son gobernadas por las posiciones de los cuerpos de agua con respecto de los sistemas de flujo subterráneo. Con base en su posición relativa en el espacio, se reconocen tres sistemas de flujo: locales, intermedios y regionales (Tóth, 1999). Existen flujos en uno u otro sentido que se traducen en recarga (infiltración de agua hacia la zona de saturación) o descarga de los acuíferos (salida de agua subterránea en el cauce de los ríos o en el fondo del vaso de lagos, embalses o incluso en el mar). El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca. Una parte del agua de precipitación que se infiltra se denomina escurrimiento subterráneo y es lo único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias; por eso se dice que forma el escurrimiento base (Aparicio, 1992). En ríos perennes, el flujo base es en general continuo y presenta una condición efluente (el acuífero aporta al río). Los ríos intermitentes reciben agua solamente en ciertos periodos del año y pueden ser influentes (el río aporta al acuífero) o efluentes. Los ríos efímeros dependen solo del escurrimiento directo (Sophocleus, 2002).

Para caracterizar las interacciones agua superficial-agua subterránea, se emplean técnicas de separación del hidrograma (Killian *et al.*, 2019; Arnold, 1999). El objetivo de este estudio es calcular el caudal base del río Querétaro, con base en el análisis de la serie histórica de datos hidrométricos durante el periodo 1962-2014, para determinar la aportación del acuífero al río, considerando su marco hidrogeológico.

Zona de estudio

El estado de Querétaro pertenece a las regiones hidrológicas Pánuco y Lerma Santiago. La zona de estudio se restringe a la subcuenca del río Querétaro

(con una superficie de aportación de 2,355.60 km²) y al acuífero Valle de Querétaro. El río Querétaro nace en la porción centro occidental del estado y adopta un rumbo NE-SW que cambia a E-W al entrar al valle y atravesar la ciudad. Se ha calculado un volumen medio anual de escurrimiento de 15.97 Mm³/a y un volumen anual comprometido de 15.99 Mm³/a, por lo que su disponibilidad presenta un déficit de -0.02 (DOF, 2010). El acuífero Valle de Querétaro tiene una extensión de 484 km². Se ha calculado una recarga de 70 Mm³/a, así como las salidas en 137 Mm³/a, con una disponibilidad de -67.01 Mm³/a, que corresponde a déficit (CONAGUA, 2015).

En la figura 1 se presenta la localización de la subcuenca del río Querétaro, la estación hidrométrica El Batán (EH12258), la red piezométrica y la litología representativa de la subcuenca.

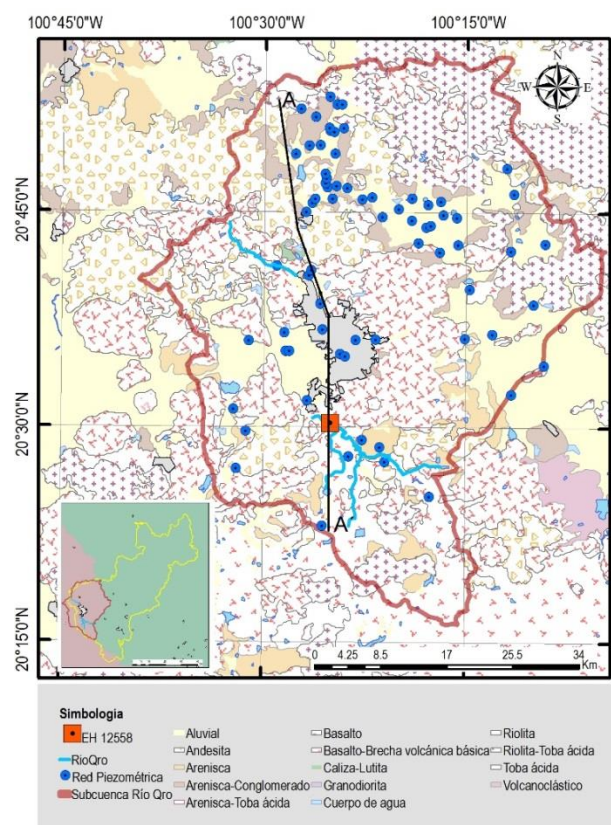


Figura 1. Localización de la subcuenca del río Querétaro. Se presentan las unidades litológicas, la red de monitoreo de agua subterránea (piezómetros) y la estación hidrométrica (EH-El Batán). Fuente: elaboración propia con base en datos del INEGI (2002) y CONAGUA (2014).

En el valle de Querétaro, el acuífero se comporta como confinado, es decir, existe una capa de arcilla en el subsuelo de la ciudad. A profundidad, el acuífero se divide en un sistema de fosas escalonadas, sepultadas por sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos. Las partes más profundas del acuífero son de aproximadamente 600 m. El acuífero es heterogéneo y está integrado por variaciones litológicas importantes, que se presentan en sentido horizontal y vertical. En la década de 1970, empezó un incremento en la explotación del acuífero; cuando el nivel freático disminuyó, alcanzó las capas de baja conductividad hidráulica, el acuífero varió en algunas localidades de confinado a libre y se definieron dos sistemas de flujo subterráneo: local e intermedio (Herrera *et al.*, 2007). En la figura 2, se presenta un esquema simplificado de funcionamiento hidrogeológico orientado N-S (perfil A-A') y las elevaciones del nivel estático indican que, en promedio, se encuentran a 1800 msnm. La ciudad de Querétaro se encuentra en un valle, por lo que la zona norte y la zona sur se consideran zonas de recarga subterránea.

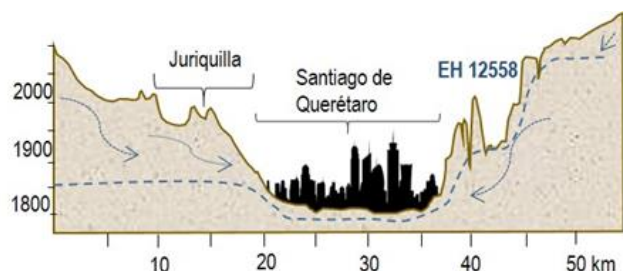


Figura 2. Sección A-A' simplificada de funcionamiento hidrogeológico de la subcuenca del río Querétaro. Fuente: elaboración propia con base en datos de elevaciones topográficas del INEGI (2000).

Metodología

Red de monitoreo de cuencas

En la subcuenca del río Querétaro, se localiza la estación hidrométrica 12558, con un registro histórico de 1962-2014 (BANDAS, 2014). Para el análisis de flujo base, se consideraron los datos registrados de caudal diario de la estación hidrométrica y se organizaron los caudales mensuales en años naturales durante el periodo analizado, con base en el procedimiento que se aplica en la NMX-159 (2012) para el cálculo de los

caudales ordinarios. Los datos de la estación hidrométrica reciben tanto aportaciones naturales como antrópicas, las cuales no se distinguen en este trabajo; por tanto, se calculó un escurrimiento medio anual de $18.9 \text{ Mm}^3/\text{año}$. En la figura 3, se presenta el hidrograma representativo de la estación hidrométrica.

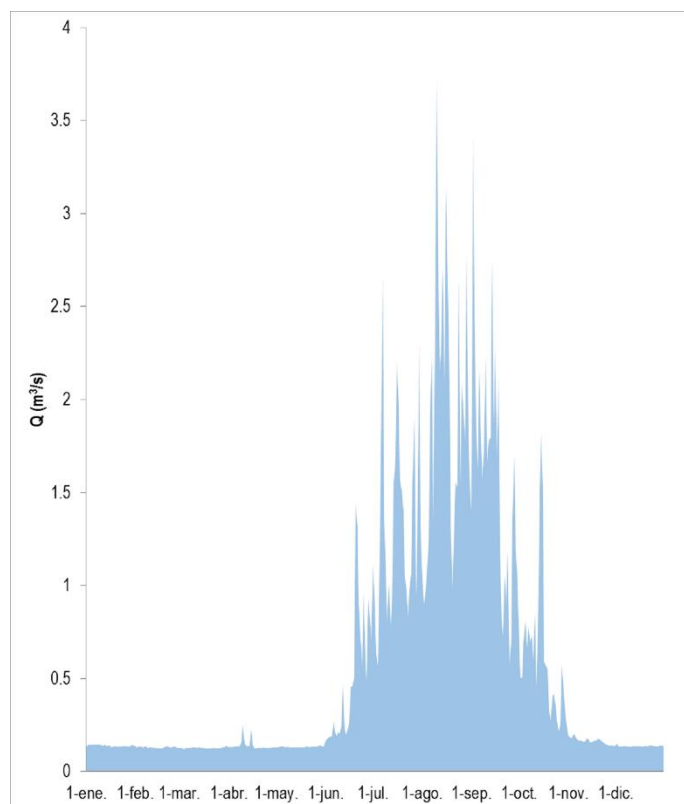


Figura 3. Hidrograma del río Querétaro. Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA (2014).

Red de monitoreo de acuíferos

Con base en la red piezométrica, se puede realizar una configuración de la elevación del nivel estático para identificar cualitativamente las direcciones preferenciales de flujo subterráneo. Bajo condiciones de poca precipitación, el flujo base de muchos ríos constituye la descarga para la mayor parte del año (condición efluente); asimismo, en un mapa de configuración del nivel estático, las líneas de flujo van en dirección al río (USGS, 2016). Para la configuración de la elevación del nivel estático, se consideraron 71 piezómetros de la red de monitoreo aplicando interpolación IDW (QGIS, 2018). En la figura 4, se presentan la elevación del nivel estático

y la elevación de los brocales de CONAGUA (2014), que realiza un monitoreo anual.

$$q_t = \alpha x q_{t-1} + \frac{(1+\alpha)x}{2}(Q_t - Q_{t-1})$$

Ecuación 1.

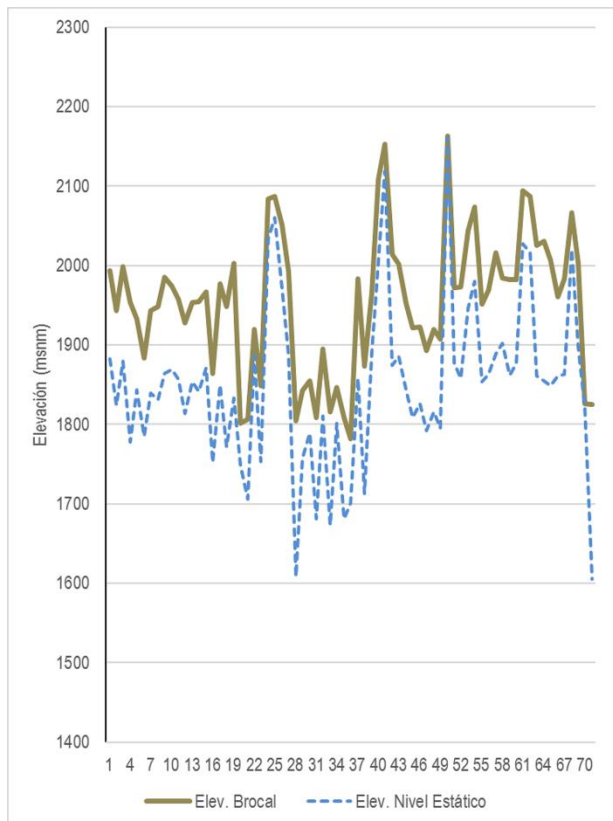


Figura 4. Red piezométrica. Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA (2014).

Determinación del caudal base

La cuantificación del flujo base es importante para el manejo sustentable de la interacción río-acuífero (Dwandel *et al.*, 2003). En las cuencas, el flujo base es un componente hidrológico importante para el entendimiento de los procesos de escurrimiento, por lo que los métodos de separación de flujo base han sido tópicos de investigaciones. Gonzales *et al.* (2009) realizan una comparación de los diferentes métodos de separación del flujo base en una cuenca baja empleando trazadores, aproximaciones gráficas y filtros digitales; de tal manera, identificaron que, con el filtro digital recursivo de Eckhardt (2005), se obtienen los mejores resultados en comparación con los trazadores. Lim *et al.* (2005) incorporan este filtro como una herramienta web para el análisis de hidrogramas, el cual se aplicó en este trabajo. La ecuación 1 muestra el filtro utilizado (Lim *et al.*, 2005):

En esta ecuación, q_t es el escurrimiento directo al tiempo t (m^3/s); q_{t-1} es el escurrimiento directo al paso de tiempo $t-1$, (m^3/s); α es un parámetro del filtro; Q_t es el escurrimiento total al tiempo t (m^3/s) y Q_{t-1} es el escurrimiento total al tiempo $t-1$ (m^3/s).

Resultados

Para la determinación del caudal base, se aplicó el filtro digital a la serie histórica de caudal de la estación hidrométrica (EH 12558) para los periodos 1962-1988 y 1989-2014. En la figura 5, se presenta el hidrograma de caudal promedio y el flujo base. Se observa que, durante los meses de enero a mayo y de noviembre a diciembre, tanto el escurrimiento como el flujo base alcanzan caudales de $0.1 m^3/s$ y corresponden a la época de secas. De junio a noviembre, hay un mayor escurrimiento y el caudal base también aumenta. En la tabla 1, se presenta el cálculo de caudal base mensual. De enero a mayo, se tienen caudales de $0.102 m^3/s$ para ambos periodos. De junio a agosto, existe una disminución promedio de $0.329 m^3/s$ de caudal base respecto del segundo periodo. En septiembre, se mantiene el valor de caudal base y, de octubre a diciembre, hay una disminución de $0.075 m^3/s$ para el segundo periodo. Para fines de gestión, los valores de caudales en m^3/s se convirtieron a $Mm^3/año$. Se calculó que, para el periodo 1962-1988, el caudal base es de $10.5 Mm^3/a$, así como de $7.1 Mm^3/a$ para el periodo 1989-2014.

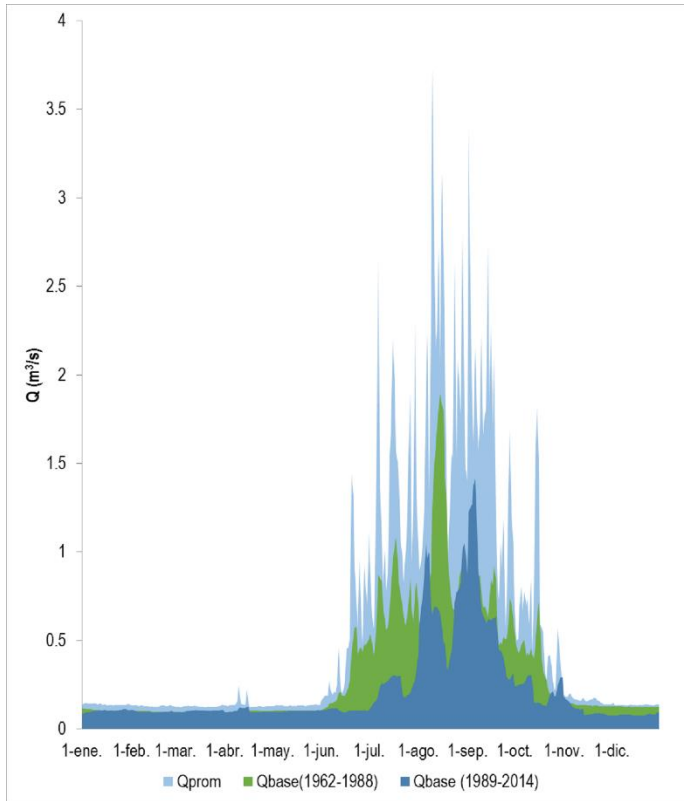


Figura 5. Separación del hidrograma para la determinación del caudal base para el periodo 1962-1988. Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA (2014).

	Qmensual	Qb(62-88)	Qb(89-14)
Enero	0.139	0.107	0.102
Febrero	0.130	0.100	0.098
Marzo	0.127	0.097	0.102
Abril	0.140	0.102	0.102
Mayo	0.132	0.104	0.102
Junio	0.482	0.283	0.106
Julio	1.301	0.714	0.232
Agosto	1.909	1.024	0.697
Septiembre	1.616	0.688	0.686
Octubre	0.626	0.367	0.217
Noviembre	0.165	0.135	0.105
Diciembre	0.136	0.126	0.081

Tabla 1. Determinación de caudal base para los periodos 1962-1988 y 1989-2014 (Q: caudal; Qb: caudal base; valores en m³/s). Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA (2014).

Los datos de la red piezométrica indican que existe un espesor no-saturado de 107 m en promedio, es decir, que el agua subterránea se extrae a esta profundidad. Se identificó un par de piezómetros (Escondida y P0233QR) que tienen una profundidad del nivel estático de 3 y 4 m, respectivamente, lo que indica que corresponden a agua subterránea de flujos locales. La configuración del nivel estático indica que las direcciones de flujo subterráneo van hacia el Valle de Querétaro, por lo que se infiere que es un río del tipo efluente, es decir, que el acuífero le aporta al río (figura 6).

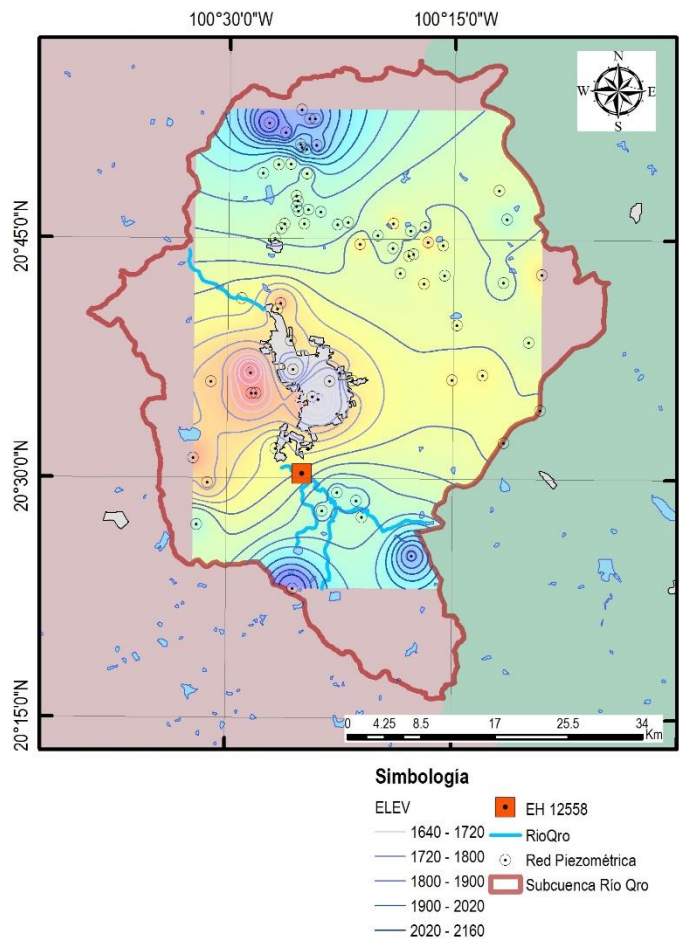


Figura 6. Configuración de la elevación del nivel estático (msnm) en la subcuenca del río Querétaro. Fuente: elaboración propia con base en datos de CONAGUA (2014).

Discusión

En este trabajo, se calculó que el caudal base aporta al río 10.5-7.1 Mm³/a, lo que indica que hay una tendencia hacia la disminución. El caudal base representa un régimen, por lo que, durante los meses de noviembre a mayo, el escurrimiento del río depende del caudal base del acuífero. En el periodo junio-octubre hay mayor escurrimiento, que puede estar influenciado por lluvias, canalizaciones del río y retornos de agua residual. También se deben considerar los caudales extraordinarios que pueden ocasionar inundaciones (González, 2018). La separación del caudal base de los ríos es un ejemplo de la interacción río-acuífero; sin embargo, los algoritmos de separación del hidrograma no pueden identificar entre las diferentes causas de fluctuaciones (Killian *et al.*, 2019). La zona urbana está sobre un valle y las zonas topográficamente altas que la rodean funcionan como zonas de recarga; asimismo, su dirección de flujo es hacia el valle y la profundidad del nivel estático se encuentra a 107 m de profundidad. La mayor parte del agua proviene de fuentes subterráneas, lo que incrementa la demanda sobre el acuífero, acelera su abatimiento y encarece la extracción.

Se estima que la población de la zona urbana de Querétaro estará constituida por 1,600,575 habitantes para el año 2030 (CONCYTEQ, 2011). Es recomendable que se sigan manteniendo las estaciones hidrométricas-piezométricas para obtener datos que puedan ser utilizados para conocer la dinámica estacional del río-acuífero.

Conclusiones

La interacción río-acuífero debe entenderse como un sistema complejo, por lo que las decisiones de manejo de uno pueden afectar al otro. El monitoreo diario de caudales del río, así como de niveles de agua subterránea, permitirá tener una variación temporal para la aplicación de técnicas hidrológicas-hidrogeológicas, como es la separación del caudal base. En este trabajo se calculó que el caudal base aporta al río 10.5 Mm³/a para el periodo 1962-1988, así como 7.1 Mm³/a para 1989-2014, y se identificó que el caudal base tiene una variación estacional; por ejemplo, en la época de secas (noviembre-mayo), el

escurrimiento del río es principalmente por el caudal base del acuífero. Actualmente se perfora en promedio 107 m para alcanzar el nivel estático del acuífero; una mayor extracción ocasionaría un incremento en el costo y abatimiento de niveles. Entender el funcionamiento de la interacción agua superficial-agua subterránea será la base para una mejor gestión del agua.

Referencias

- Aparicio M.F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. D.F., México: Limusa.
- Arnold J.G. y Allen P.M. (1999). Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *Journal of American Water Resources Association*, 35(2), 411-424.
- BANDAS (2014). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*. México: CONAGUA. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Potada%20BANDAS.htm>
- CONAGUA (2014). *Red piezométrica*. México: CONAGUA. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-piezometrica-mapas>
- CONAGUA (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Querétaro (2201). México: CONAGUA. Recuperado de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5139682&fecha=19/04/2010
- CONCYTEQ (2011). *Diagnóstico Ambiental Integral de la Ciudad de San Juan del Río, Querétaro*. (Tomo XVII). Recuperado de: <http://www.concyteq.edu.mx/concyteq/uploads/publicacionArchivo/2017-06-992.pdf>
- Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng Ph. y Al-Malki. (2003). Evaluation of aquifer thickness by analyzing recession hydrographs. Application to the Oman Ophiolite Hard-Rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 274, 248-269.
- DOF (2010). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Río Lerma 1,2,3,4,5,6,7; Río La Gavia, Río Jaltepec, Río La Laja 1,2; Río Querétaro, Laguna de Yuriria, Río Turbio, Río Angulo, Río Zula, Río Duero, Lago Pátzcuaro y Lago Cuitzeo, que forman parte de la subregión hidrológica denominada Lerma-Chapala*. México: DOF. Recuperado de: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5139682&fecha=19/04/2010
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for base flow separation. *Hydrol. Processes*, 19, 507-515.
- González S.E. (2018). Propensión de las inundaciones históricas de los últimos 100 años en Querétaro. *Revista Digital Ciencia UAQRO*, 11(1).
- Gonzales A.L., Nonner J., Heijkers J. y Uhlenbrook S. (2009). Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 2055-2068.

Herrera Z.G.S. y Simuta C.R. (2007). Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo para el acuífero del Valle de Querétaro. 2° Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. UMSNh-aSMMNI-CIMNE. Michoacán, México.

INEGI (2000). *Relieve continental*. México: INEGI. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/default.html#Descargas>

INEGI (2002). *Geología*. México: INEGI. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/geologia/default.html#Descargas>

Killian C.D., Asquith W.H., Barlow J.R.B, Bent G.C., Kress W.H., Barlow P.M. y Schmitz D.W. (2019). Characterizing groundwater and surface water interaction using hydrograph separation techniques and groundwater level data throughout the Mississippi Delta, USA. *Hydrogeology Journal*, 1-13.

Lim, Kyoung Jae, Bernard A. Engel, Zhenxu Tang, Joongdae Choi, Ki-Sung Kim, Suresh Muthukrishnan y Dibyajyoti Tripathy (2005). Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1407-1416. Recuperado de <https://engineering.purdue.edu/mapserve/WHAT/>, NMX-AA-159-SCFI-2012. Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

QGIS (2018). *Documentación de QGIS. Análisis Espacial (Interpolación)*. Licencia Creative Commons (CC BY-SA). Recuperado de: <https://qgis.org/es/site/>

Sophocleus (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67.

Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, 7, 1-14.

USGS (2016). Groundwater and surface water, a single resource circular. 1139 Denver, Colorado: USGS. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/>