

CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA PRELIMINAR DE LOS MANANTIALES Y ARROYOS LOCALIZADOS EN EL BORDE OCCIDENTAL DE LA CUENCA DE MÉXICO

Zabala María E.^{1,2}, Martínez Sandra³, Perevochtchikova María⁴

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Rivadavia 1917 - C1033AAJ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. e-mail: mzabala@faa.unicen.edu.ar

² Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff". Av. República Italia 780 - 7300 Azul, Buenos Aires, Argentina.

³ Autoridad de Cuenca Matanza Riachuelo (ACUMAR). Esmeralda 255 PB - C1033AAJ Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

⁴ Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México AC. Camino al Ajusco NW 20, Pedregal de Sta. Teresa - 10740, Ciudad de México, México.

Resumen

El 70% del agua que abastece a la Ciudad de México es subterránea. El acuífero Zona Metropolitana Ciudad de México (ZMCM) se recarga en el bosque ubicado al SO de la Ciudad de México. Desde el año 2003 el gobierno de México implementa el Programa Federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) con el fin de mitigar la deforestación y la escasez de agua. El objetivo de este estudio es caracterizar la composición química de los manantiales permanentes y arroyos en el borde occidental de la Cuenca de México. Se analizaron 12 análisis químicos de aguas subterráneas y de arroyos obtenidos durante el año 2015, distribuidos en 6 sitios de muestreo. Se identificaron los tipos químicos de agua en dos épocas hidrológicas extremas, y se analizó la distribución espacial y temporal de la composición química. Se observa que la salinidad del agua subterránea aumenta de SO a NE, en coincidencia con la dirección principal del gradiente topográfico. Los valores de conductividad eléctrica varían desde 50 a 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En el sector topográfico más elevado las aguas son de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca/Na}$ y $\text{HCO}_3\text{.Na/Ca}$ y evolucionan a aguas de tipo $\text{HCO}_3/\text{SO}_4\text{-Na}$ en el sector más bajo. Los cambios temporales de la composición química de las muestras estudiadas son mínimos para las dos épocas hidrológicas estudiadas.

Palabras claves: Ciudad de México, manantiales, composición química, Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH).

Abstract

The 70 % of the water that supplies the Mexico City is groundwater. The Mexico City Metropolitan Zone Aquifer (Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ZMCM) recharges in the forest located in the SW of the Mexico City. Since 2003 the government of Mexico have developed a Programme of Payment for Hydrological Environmental Services (PHES) to counteract deforestation and water scarcity. The aim of this study is to characterize the chemical composition of the permanent springs and streams on the western sector of the Basin of Mexico. Twelve chemical analyses of groundwater and streams obtained during 2015 were studied. The chemical types of water in two extreme hydrological periods were identified, and the spatial and temporal distribution of the composition was analysed. Groundwater salinity increases from SW to NE, coinciding with the main direction of topographic gradient. The electrical conductivity values range from 50 to 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In the highest topographic area the types of water are $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca/Na}$ and $\text{HCO}_3\text{.Na/Ca}$, evolving to $\text{HCO}_3/\text{SO}_4\text{-Na}$ type in the lowest sector. The temporal changes in the chemical composition of the samples studied are minimal for the two hydrological periods studied.

Keywords: México City, springs, chemical composition, Payment for Hydrological Environmental Services (PHES).

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En México la deforestación es un problema muy relevante. Se estima que durante el periodo 2005-2010 se han perdido alrededor de 155000 has por año (INEGI, 2013). Algunas de las causas que originan la deforestación son el cambio de uso de suelo por la expansión urbana y las políticas públicas que fomentan la producción agropecuaria y ganadera, la tala ilegal, las enfermedades y plagas, y los incendios forestales (Hughes et al. 2000; Geist y Lambin, 2002). La deforestación provoca la erosión y degradación del suelo, modifica la infiltración y recarga del agua al suelo y acuífero, provoca cambios en la evapotranspiración, en la degradación de hábitat natural, y también genera impactos de carácter socio-económico (FAO, 2012). Desde el año 2003 el gobierno de México implementa como instrumento de política pública ambiental el Programa Federal de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) con el fin de mitigar la deforestación, la escasez de agua y mejorar el bienestar humano por medio de compensaciones económicas otorgadas a los propietarios de las tierras por la realización de actividades que garanticen la permanencia y el uso de ecosistemas a largo plazo (Fregoso, 2006; Manson, 2007; Perevochtchikova y Vázquez, 2012; Perevochtchikova y Oggioni, 2014). Desde 2003 a 2015 el programa fue aplicado en 5000 millones de hectáreas y se involucraron 8494 propietarios, por lo que se convirtió en uno de los programas federales más importante del mundo (CONAFOR, 2016). Pero dicho programa presenta ciertas limitaciones, sobre todo en relación a la falta de estudios sobre los efectos que ha generado en la sociedad y en el medio ambiente (Muñoz-Piña et al., 2008; Perevochtchikova y Ochoa, 2012; Perevochtchikova y Vázquez, 2012; Almeida Leñero et al., 2014; Perevochtchikova et al., 2015). Varios autores han desarrollado herramientas para cuantificar el impacto de este programa (Vigerstol y Aukema, 2011; Jujnovsky et al., 2012; Caro-Borrero et al., 2015), pero en general éstas se basan en la cuantificación del recurso hídrico a través del uso de metodologías hidrológicas tradicionales. Los estudios hidrogeológicos, más específicamente los hidroquímicos son escasos (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013).

En este contexto, el objetivo general de este trabajo es presentar los resultados preliminares del estudio hidroquímico que se está realizando en la zona de la Sierra del Ajusco con muestras de aguas provenientes de manantiales y arroyos ubicados dentro de los sitios receptores de PSAH. Los objetivos específicos son: establecer los rangos de concentraciones de los elementos físico-químicos y analizar la distribución espacial y temporal de la composición química de las aguas subterráneas y superficiales considerando los cambios hidrológicos estacionales. El presente estudio forma parte de las actividades realizadas por investigadores de El Colegio de México y de otras instituciones en el marco de dos proyectos 155039 CB-CONACYT y 246947 PN-CONACYT, en los cuales evalúan los efectos de la aplicación de estos programas.

Características generales de la zona de estudio

La Ciudad de México (CM) y la zona metropolitana poseen una población de alrededor de 9 y 22 millones de habitantes respectivamente. El 70% del agua que abastece a la CM es subterránea. El acuífero Zona Metropolitana Ciudad de México (ZMCM) se recarga en el bosque ubicado al suroeste de la CM. El cambio de uso de suelo en la CM ha llegado a un promedio de 239 ha al año, principalmente debido a la deforestación para el uso urbano y agrícola (Aguilar y Santos 2011). En este contexto, se han implementado múltiples instrumentos de política pública ambiental, social y urbana en este territorio, proveniente de tres ámbitos de gobierno: federal, estatal y delegacional (Pérez Campuzano et al., 2011). Uno de ellos es el programa de PSAH de la CONAFOR, aplicado en el Suelo de Conservación (SC) por su alta importancia hídrica en relación a la captación del agua subterránea (Escolero et al. 2009; Perevochtchikova et al., 2015)

El área de estudio es parte de la delegación de Tlalpan y se encuentra enmarcada en el SC de la CM. Cuenta con una población de 650.567 habitantes (INEGI, 2010). La parte

norte Tlalpan es urbana, mientras que la parte sur es principalmente rural y comprende una parte significativa de la Sierra del Ajusco, sector que alberga una parte importante del bosque de la ciudad.

Los manantiales y arroyos estudiados se localizan al suroeste de la CM, en el sector de piedemonte de las Sierras de Las Cruces (SLC), más específicamente en la Sierra del Ajusco entre los 3500 y 2300 msnm (Figura 1). Y pertenecen a la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México (CONAGUA, 2011). Forman parte del Río Grande de Amacuzac, y de la micro cuenca de Tres Marías y Santiago (PAOT, 2012).

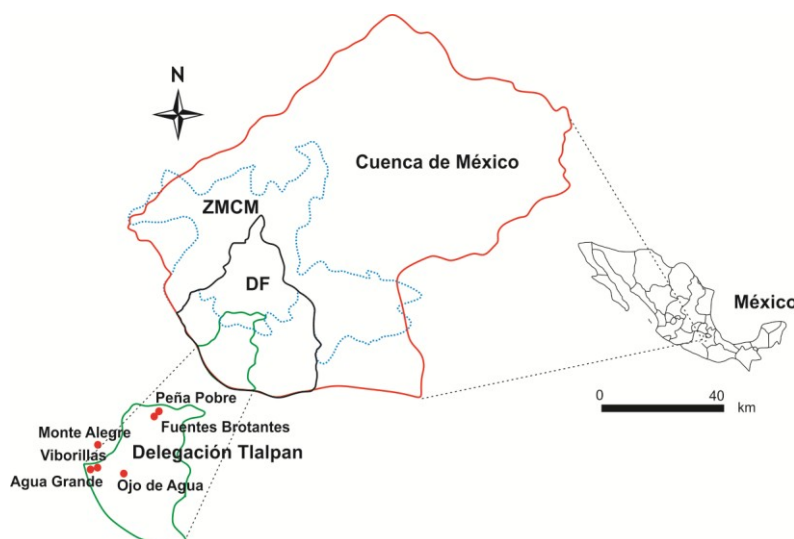


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona de estudio (Fuente: elaboración de Nidya Aponte, con base en datos de campo, 2015).

El clima en la zona alta es semi frío, sub-húmedo Cb'(w2). Considerando los datos de tres estaciones meteorológicas ubicadas en Tlalpan pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional (El Guarda a 2990 msnm, Desviación Alta al Pedregal, 2296 msnm y El Calvario 61 a 2726 msnm), las precipitaciones medias anuales para el periodo 1961-2014, 1952-2014 y 1970-2014, son de 1300, 1100 y 900 mm respectivamente. Las lluvias disminuyen de suroeste a noreste. Las máximas precipitaciones ocurren entre junio y septiembre mientras que las mínimas se registran entre diciembre y abril.

Geología e hidrogeología

La SLC constituye el límite occidental de la Cuenca de México. Tiene una longitud de 110 km, un ancho entre 27 y 47 km y una elevación máxima de 3800 msnm. Está compuesta por ocho estratovolcanes traslapados, y algunos de menor dimensión como es el volcán Ajusco y es atravesada por tres sistemas de fallas. En estas sierras se han identificado distintas unidades geológicas (Formación El Ajusco, Formación Las Cruces, Grupo Chichinautzin) que representan distintos periodos eruptivos ocurridos desde el Plioceno superior al Holoceno (Mooser et al., 1974; Osete et al., 2000). Estas unidades se componen de rocas volcánicas de composición dacítica y andesítica (Delgado-Granados y Martín del Pozo, 1993; García-Palomo et al., 2008; Arce et al., 2015), están fuertemente fracturadas e hidrogeológicamente se comportan como un acuífero. El acuífero ZMCM se extiende por toda la Cuenca de México y puede comportarse como semiconfinado, confinado o libre, dependiendo de la zona que se considere. En el sector estudiado se comporta como un acuífero libre. El movimiento del agua subterránea es controlado tanto por los gradientes hidráulicos como por la litología y las estructuras geológicas (Edmunds et al., 2002). Bajo condiciones naturales la recarga del acuífero se produce en los materiales permeables ubicados en los sectores topográficos más elevados que rodean a la Cuenca de

México, mientras que la descarga ocurre a través de manantiales y cursos de agua superficiales (Edmunds et al., 2002; Carrillo-Rivera et al., 2008; Leyva Suárez, 2010).

METODOLOGÍA

Se ha estudiado un total de 12 análisis químicos, 8 correspondientes a manantiales (Ojo de Agua, Agua Grande, Fuentes Brotantes y Peña Pobre) y 4 correspondientes a arroyos (Monte Alegre y Viborillas). Las muestras Ojo de Agua, Agua Grande, Monte Alegre y Viborillas se ubican en el sector rural del borde occidental de la CM, en la zona de recarga del acuífero, mientras que las muestras Fuentes Brotantes y Peña Pobre se localizan próximas al casco urbano de la ciudad. Las muestras fueron recolectadas por investigadores de El Colegio de México y otros colaboradores durante dos campañas realizadas en dos épocas hidrológicas extremas, en abril (periodo seco) y en septiembre (periodo húmedo) del año 2015. En campo se procedió a la toma de las muestras previo lavado y rotulado de las botellas. In situ se midieron los parámetros inestables conductividad eléctrica (CE), pH, temperatura del agua y caudal. Los análisis químicos se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica Ambiental perteneciente al Centro de Geociencias (Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM). Los cationes Ca, Mg, Na, K, Si y Al se midieron con ICP-Óptico y los aniones Cl, SO₄, NO₃, F por HPLC. Todos los análisis químicos poseen un error de balance < 10 %.

La metodología del estudio ha consistido en los siguientes pasos: 1- Establecer los rangos de variación de las variables físico-químicas y de las componentes químicas medidas; 2- Identificar los tipos químicos de agua en dos épocas hidrológicas extremas; 3- Analizar la distribución espacial y temporal de la composición química del agua de los manantiales y de los arroyos.

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En ambos muestreos los valores de CE varían entre 49 y 243 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y aumentan de suroeste a noreste en coincidencia con la dirección principal del gradiente topográfico (Figura 2). Las muestras correspondientes a los arroyos (Monte Alegre y Viborillas) son las que poseen los valores de CE más bajos (49-67 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Las muestras recolectadas en la época de lluvia poseen una salinidad algo menor que las muestras recolectadas en abril, a excepción de la muestra correspondiente a Fuentes Brotantes donde se observa lo contrario.

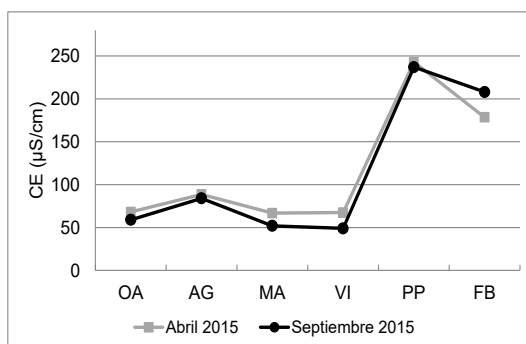


Figura 2. Valores de CE medidos campo correspondiente a los muestreos de abril y septiembre de 2015. OA: Ojo de Agua; AG: Agua Grande; MA: Monte Alegre; VI: Viborillas; PP: Peña Pobre; FB: Fuentes Brotantes (ver la ubicación de los puntos en la figura 1).

Los valores de pH de las muestras recolectadas durante el período seco varían entre 7.3 y 7.7, mientras que en las muestras del período húmedo los valores de pH varían entre 6.4 y 7. Los valores de temperatura del agua medidos en abril varían entre 9.5 y 17°C. En este periodo las máximas temperaturas se han medido en las muestras ubicadas en el

sector urbano (Fuentes Brotantes y Peña Pobre) y en el arroyo Monte Alegre (15°C). En septiembre las temperaturas medidas son menores y varían entre 9 y 15°C. Al igual que en el muestreo de abril, las máximas temperaturas se han medido en las muestras ubicadas en el sector urbano y en el arroyo Monte Alegre (12°C).

En la Figura 3 se presentan los valores de caudales medidos en los muestreos de abril y septiembre. En los puntos Peña Pobre y Fuentes Brotantes estas mediciones no se han podido realizar por problemas de acceso y seguridad. En esta figura se observa que en el caso de los manantiales, los caudales medidos en dos épocas hidrológicas diferentes no presentan diferencias importantes, mientras que en los arroyos claramente los valores de caudales son mayores en la época de lluvia.

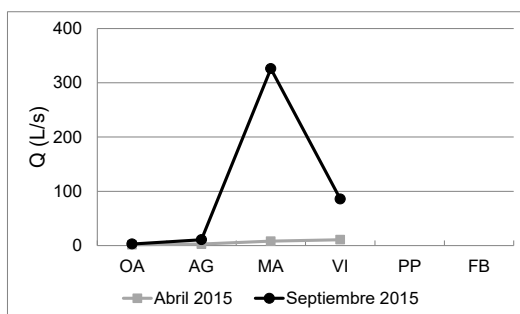


Figura 3. Valores de caudales correspondiente a los muestreos de abril y septiembre de 2015. OA: Ojo de Agua; AG: Agua Grande; MA: Monte Alegre; VI: Viborillas; PP: Peña Pobre; FB: Fuentes Brotantes (ver la ubicación de los puntos en la figura 1).

En la Figura 4 se pueden observar los rangos de variación de los valores de las variables físico-químicas y de las concentraciones de los componentes químicos de las muestras estudiadas (manantiales y arroyos).

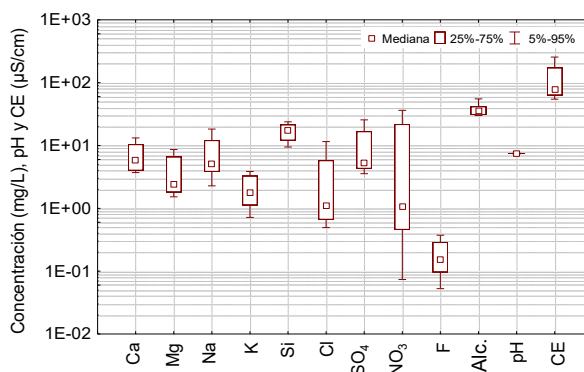


Figura 4. Diagrama de cajas de las componentes químicas y de las variables físico-químicas analizadas.

Para todo el conjunto de muestras analizadas se observa que las variables con un rango de variación de valores mayor son el NO₃ y el Cl. Las concentraciones de NO₃ oscilan entre 0.07 y 36 mg/L mientras que las de Cl lo hacen entre 0.49 y 11.50 mg/L. Mientras que los parámetros con un menor rango de variación son el pH (valores entre 7.24-7.80), la alcalinidad (contenidos entre 30 y 55 mg/L) y la Si (contenidos entre 9.5 y 23.8 mg/L). Las concentraciones de Ca, Mg, Na y K, varían entre 3.7 y 13.2, 1.5 y 8.6, 2.3 y 18.3, 0.7 y 3.9 mg/L respectivamente. La concentraciones de F oscilan entre 0.05 y 0.37 mg/L y las de SO₄ lo hacen entre 3.56 y 25.62 mg/L.

En la Figura 5 se observa que en el sector topográfico más elevado las aguas son de tipo HCO₃-Ca, HCO₃-Ca/Na y HCO₃-Na/Ca y evolucionan a aguas de tipo HCO₃/SO₄-Na en el sector más bajo.

Las muestras correspondientes a los arroyos Monte Alegre y Ojo de Agua son las aguas menos mineralizadas, mientras que las más mineralizadas son aquellas localizadas en el sector más densamente poblado. Respecto a los cambios temporales de la composición química de las muestras analizadas, estos son en general mínimos para las dos épocas hidrológicas estudiadas. Algunas diferencias se observan en las muestras de los puntos de Fuentes Brotantes y Peña Pobre donde en las muestras de septiembre se observa un ligero aumento de la salinidad.

Las muestras de agua localizadas en el sector suroeste de la zona de estudio se caracterizan por ser aguas muy poco mineralizadas y de muy buena calidad química, lo que estaría señalando que el tiempo de permanencia del agua dentro del acuífero es muy corto. En este sector el agua de lluvia se infiltra en las rocas volcánicas a través de sus sistemas de fracturas y descarga tanto en manantiales como en arroyos. La salinidad del agua subterránea aumenta en dirección noreste en parte por el mayor tiempo de permanencia del agua dentro del acuífero pero además por las actividades humanas que se desarrollan en ese sector de la zona de estudio. Considerando a los contenidos de NO_3 y Cl como indicadores de contaminación se observa que en las aguas menos mineralizadas los contenidos de NO_3 y Cl varían entre 0.07 - 1.06 y 0.49 - 1.22 mg/L respectivamente, estas bajas concentraciones indican que el origen de estos solutos es el agua de lluvia.

En el caso de las aguas más mineralizadas los contenidos de NO_3 varían entre 17 - 36 mg/L mientras que los de Cl lo hace entre 4 - 12 mg/L. La dispersión de los datos observada en los diagramas de caja de estos solutos (Figura 4) sugiere la existencia de fuentes variadas, como puede ser el aporte atmosférico y las actividades humanas, las cuales están afectando la calidad química del recurso hídrico.

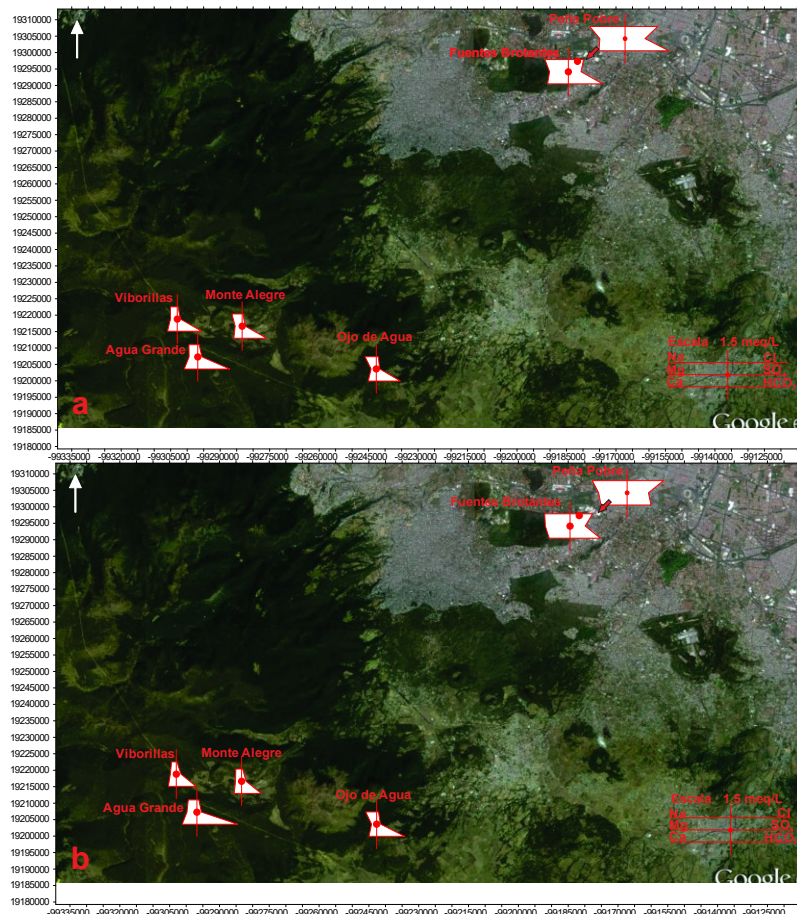


Figura 5. Diagramas de Stiff de los manantiales y arroyos para dos condiciones hidrológicas extremas correspondientes al año 2015. a: período seco. b: período húmedo.

CONCLUSIONES

Las aguas en el sector topográfico más elevado son de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Ca/Na}$ y $\text{HCO}_3\text{-Na/Ca}$ y evolucionan a aguas de tipo $\text{HCO}_3\text{/SO}_4\text{-Na}$ en el sector topográfico más bajo. Este aumento de la salinidad hacia el noreste se debe a un aumento del tiempo de permanencia del agua dentro del acuífero, lo que conlleva a un mayor tiempo de contacto entre el agua y los minerales del terreno, pero además se debe a que estos puntos están localizados en un sector altamente poblado, por lo que las actividades humanas están impactando en la calidad química del recurso hídrico.

Con respecto a los cambios temporales de la composición química de las muestras de agua estudiadas, se observa que para las dos épocas hidrológicas estudiadas los cambios son mínimos.

Este estudio hidroquímico forma parte de un trabajo mayor en el cuál se está analizando cómo impacta la aplicación de estos programas en la calidad química del recurso hídrico.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento del proyecto 155039 de Ciencia Básica, 246947 de Problemas Nacionales y 260199 de estancia sabática. A la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, en especial a Moisés Reyes Flores por su constante acompañamiento.

REFERENCIAS

- Aguilar AG, Santos C.** 2011. Asentamientos informales y preservación del medio ambiente en la Ciudad de México. Un dilema para la política de uso del suelo. En: Perez Campuzano, E., Perevochtchikova, M., Ávila Foucat V.S. (Eds.). Suelo de Conservación del DF ¿hacia una gestión y manejo sustentable? IPN, MA Porrúa, México. pp. 93-124.
- Almeida Leñero L, Revollo Fernández D, Caro Borrero A, Figueroa F, Espinosa DM, Cruz G, Mazari-Hiriart M.** 2014. El Pago por Servicios Ambientales en México 2010: una evaluación multidisciplinaria. En: Perevochtchikova, M. (Ed.). Pago por servicios ambientales en México un acercamiento para su estudio. El Colegio de México AC. México DF. pp. 155-178.
- Arce JL, Layer P, Martínez I, Salinas JI, Macías-Romo MC, Morales-Casique E, Benowitz J, Escolero O, Lenhardt N.** 2015. Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67(2), 123-143.
- Caro-Borrero A, Carmona-Jiménez J, González-Martínez T, Mazari-Hiriart M.** 2015. Hydrological evaluation of a peri-urban stream and its impact on ecosystem services potential. Global Ecology and Conservation, 3, 628-644.
- Carrillo-Rivera JJ, Cardona A, Huizar-Alvarez R, Graniel E.** 2008. Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. Environ Geol, 55, 303-319.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).** 2016 Available at www.conafor.gob.mx/web/apoyos (Accesed 15 March 2016).
- CONAGUA.** 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Comisión Nacional del Agua, México.
- Delgado-Granados H, Martín del Pozo AL.** 1993. Pliocene to Holocene volcanic geology at the junction of Las Cruces Chichinautzin and Ajusco ranges, southwest of Mexico City. Geofis. Int., 32 (3), 511-522.
- Edmunds WM, Carrillo-Rivera JJ, Cardona A.** 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. Journal of Hydrology, 258, 1-24.
- Escolero O, Martínez S, Kralisch S, Perevochtchikova M.** 2009. Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático. ICyTDF, PINCC-UNAM, I Geol-UNAM, COLMEX, México.
- FAO.** 2012. El estado de los bosques del mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, 2012.

- Fregoso A.** 2006. La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica*, 78, 29-46.
- García-Palomo A, Zamorano JJ, López-Miguel C, Galván-García A, Carlos-Valerio V, Ortega R, Macías JL.** 2008. El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25(1), 158-178.
- Geist H, Lambin E.** 2002. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 2(52), 143-150.
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ.** 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications*, (10), 515-527.
- INEGI.** 2010. Censo de población y vivienda 2010. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?src=487&e=9>
- INEGI.** 2013. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/foresta10.pdf>
- Jujnovsky J, González-Martínez T, Cantoral-Uriza E, Almeida-Leñero L.** 2012. Assessment of water supply as an ecosystem service in a rural-urban watershed in southwest Mexico City. *Environ. Manag.*, 49 (3), 690-702.
- Leyva Suárez E.** 2010. Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría. 231 pp.
- Manson RH.** 2007. Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH. Informe final, INECOL, México.
- Mooser F, Nair AEM, Negendank JFW.** 1974, Paleomagnetic investigations of Tertiary and Quaternary igneous rocks; VII, A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico: *Geologische Rundschau*, 63, 451-483.
- Muñoz-Piña C, Guevara A, Torres JM, Braña J.** 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: Analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 65, 725-736.
- Osete ML, Ruiz-Martínez VC, Caballero C, Galindo C, Urrutia-Fucugauchi J, Tarling DH.** 2000. Southward migration of continental volcanic activity in the Sierra de Las Cruces, Mexico: palaeomagnetic and radiometric evidence. *Tectonophysics*, 318, 201-215.
- PAOT.** 2012. Atlas geográfico del Suelo de Conservación del Distrito Federal. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, SEDEMA, México.
- Peñuela-Arévalo LA, Carrillo-Rivera JJ.** 2013. Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico Catchment. *Environ Earth Sci.*, 68, 999-1013.
- Pérez Campuzano E, Perevochtchikova M, Avila Foucat VS.** 2011. Suelo de Conservación del Distrito Federal ¿hacia una gestión y manejo sustentable? IPN, MA Porrúa, México.
- Perevochtchikova M, Ochoa AM.** 2012. Avances y limitantes del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en México, 2003-2009, *Rev. Mex. Cien. For.*, 3(10), 89-112.
- Perevochtchikova M, Vázquez A.** 2012. The federal program of Payment for Hydrological Environmental Services as an alternative instrument for Integrated Water Resources Management in Mexico City. *The Open Geography Journal*, 5, 35-46.
- Perevochtchikova M, Oggioni J.** 2014. Global and Mexican analytical review of the state of the art on ecosystem and environmental services: A geographical approach. *Inv. Geográficas, Boletín* N° 85, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 47-65.
- Perevochtchikova M, Rojo Negrete IA, Martínez S, Fuentes Mariles GE.** 2015. Información hidroclimatológica para la evaluación de los efectos del programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos. Caso de estudio de la comunidad de San Miguel y Santo Tomás Ajusco, México. *Rev. Latin. de Rec. Naturales*, 11(1), 37-55.
- Vigerstol KL, Aukema JE.** 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *J Environ Manage*, 92, 2403-2409.