

Caracterización hidrológica e hidroquímica en la zona geotérmica de Los Negritos, Michoacán

Eliana Rosas Verdugo y Zayre I. González Acevedo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, BC.
México. Correo: erosas@cicese.edu.mx, zgonzale@cicese.mx

RESUMEN

La actividad geotérmica natural de los yacimientos se manifiesta de distintas formas en la superficie, por lo que una caracterización hidrológica e hidroquímica es de gran importancia para conocer el estado actual del sitio. Los Negritos es una zona con manifestaciones termales que se ubica en el estado de Michoacán, dentro del municipio de Villamar, a unos 10 km al oriente de Sahuayo. El objetivo de este trabajo es conocer la hidrología superficial del sitio para identificar las direcciones de flujo de las corrientes y los cambios estacionales de la composición hidroquímica de algunas variables físicoquímicas. Para ello, se realizó la caracterización geomorfológica que revela las principales características de la hidrología. Para obtener los resultados de la composición hidroquímica se llevaron a cabo cuatro muestreos del agua superficial de la zona, dos de ellos en temporada de secas y dos en temporada de lluvias, durante dos ciclos anuales (2015-2016). La zona está en una cuenca hidrológica pequeña, con una superficie de 968.13 km². Es una cuenca de tipo valle, erosionada, con pendientes suaves en el área de las manifestaciones, con una dirección de flujo de SE a NO. La mayoría de las corrientes han sido canalizadas y se utilizan para el riego de campos agrícolas, llegando al Río Sahuayo que fluye hasta el Lago de Chapala, en el estado de Jalisco. Los resultados de isótopos muestran que el agua que se midió fue altamente influenciada por los procesos de evaporación y precipitación en la zona. Los parámetros de campo y los nutrientes se relacionan con la actividad geotérmica natural del sitio. Los valores más altos de cloruros se asocian con la actividad geotérmica y se pueden observar debido a la geomorfología estudiada en la cuenca, misma que se caracteriza por presentar pendientes suaves. Las concentraciones de fluoruros evidencian dos fuentes alternas antropogénicas. La distribución de sulfatos y cloruros se relacionan a una estacionalidad anual, teniendo influencia de fuentes antropogénicas durante el último muestreo. Es importante evaluar las estacionalidades para observar si existen procesos de evaporación que concentren elementos o compuestos a estudiar, además de la caracterización de la cuenca para poder visualizar movimiento y fuentes externas.

Palabras clave: Hidroquímica, hidrología, Los Negritos, Michoacán

Hydrologic and hydrochemical characterization in the Los Negritos, Michoacán, geothermal zone

ABSTRACT

The reservoirs' natural geothermal activity occurs in different ways at the surface, for which a hydrological and hydrochemical characterization is of great importance to know the current state of the site. Los Negritos is a thermal manifestation zone located in the state of Michoacan, inside the Villamar municipality, around 10 km west of Sahuayo. The objective of this work is to know the superficial hydrology of the site in order to identify the direction of the superficial streams flow and the seasonal changes in hydrochemical composition of some physicochemical variables. For this, a geomorphological characterization was carried out, revealing the main characteristics of hydrology. In order to obtain the results of the hydrochemistry, four samples of the superficial water of the zone were carried out, two of them in the dry season and two in the rainy season, during two annual cycles (2015-2016). The area is in a small hydrological basin, with an area of 968.13 km². It is a basin of the valley type, eroded, with

smooth slopes in the manifestations area, flowing in direction SE to NW. Most of the streams have been channeled and used for irrigation of agricultural fields, reaching the Sahuayo River that flows to the Chapala Lake, in the state of Jalisco. The results of isotopes show that sampled water was highly influenced by evaporation and precipitation processes in the area. Field parameters and nutrients are related to the site's natural geothermal activity. The highest values of chlorides are associated with geothermal activity and can be observed due to the geomorphology of the basin, which is characterized by gentle slopes. Fluoride concentrations show two alternate anthropogenic sources. The distribution of sulfates and chlorides is related to annual seasonality, influenced by anthropogenic sources during the last sampling. It is important to evaluate the observations to observe if there are evaporation processes that concentrate elements or compounds to study, besides the characterization of the basin to be able to visualize movement and external sources.

Keywords: Hydrology, hydrochemistry, Los Negritos, Michoacán

1. Introducción

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar de acuerdo a los procesos que los originan en: yacimientos hidrotermales convectivos, sistemas dominados por fase de vapor, sistemas dominados por agua en fase líquida, cuencas sedimentarias, recursos geopresurizados, recursos radiogénicos, recursos de roca seca y recursos de magma (Lund, 2007), los cuales presentan diferentes manifestaciones en la superficie, como manantiales, fumarolas, géiseres, entre otros.

Durante de la evaluación de una línea base para caracterizar las condiciones actuales de un sitio con potencial geotérmico, es importante tomar en cuenta la hidrología superficial pues esta se relaciona con los sistemas geológicos profundos. Estos se alimentan de la recarga del flujo subterráneo y el flujo subsuperficial, gracias a la infiltración y percolación del agua superficial (Breña y Jacobo, 2006).

La química del agua superficial puede cambiar drásticamente cuando entra en contacto con la superficie. Cuando el agua pasa a través del suelo adquiere solutos debido a la disolución total o parcial de minerales, y algunos solutos son extraídos del agua por las plantas. Los organismos del suelo liberan compuestos orgánicos solubles que también pueden acelerar la descomposición de minerales. En casos donde hay baja precipitación, la evapotranspiración adquiere mayor peso en la composición del suelo y del agua debido a que se concentran los solutos y metales en el agua y el suelo (Drever, 1997). Es por ello que en este estudio se toma en cuenta la temporalidad de las lluvias que ocurrieron en las épocas de muestreo.

La interacción del agua meteórica y el agua hidrotermal ocasiona que la composición de ambas se vea modificada por la interacción, y así elementos que se encuentran en el agua hidrotermal pueden transportarse al agua meteórica. En la zona de estudio el agua superficial tiene gran importancia, debido a que es utilizada por la población con fines recreativos, agrícolas y ganaderos. Estas actividades pueden alterar de manera permanente las características del agua superficial de la zona de estudio.

1.1. Zona de estudio

La zona geotérmica conocida como Los Negritos se ubica en el estado de Michoacán, dentro del municipio de Villamar, a unos 10 km al oriente de Sahuayo y presenta manifestaciones como manantiales termales, fumarolas, pozos de agua caliente y volcanes de lodo.

Está ubicada en la porción centro-oriental del Valle de Sahuayo, sobre sedimentos lacustres como limolitas calcáreas, que rellenan el valle sobre el que afloran las manifestaciones termales. Se localiza

cerca de la confluencia de dos provincias tectónicas conocidas como el Graben de Chapala y la Meseta Tarasca, específicamente al sur de la Ciénaga de Chapala (Hiriart et al., 2011).

En la Figura 1 (todas las figuras al final del texto) se observa que en la zona de estudio afloran principalmente basaltos del Plioceno-Cuaternario, además de suelos de tipo aluvial (INEGI, 1982a, INEGI, 1982b) que se caracterizan por procesos de transporte y de depósito.

Al noreste de Los Negritos se encuentra otro sitio con potencial geotérmico, el cual se conoce como Ixtlán de los Hervores. Este presenta manifestaciones parecidas a las de Los Negritos, consistentes en manantiales termales, pozos de agua caliente y volcanes de lodo de temperaturas entre los 48 y 94°C (Hiriart et al., 2011). En la región de Los Negritos e Ixtlán de los Hervores se presenta un conjunto de fallas normales que han sido los conductos para el ascenso de los fluidos geotérmicos. Una de las fallas más importantes es la falla Pajacuarán, de 18 km de longitud, la cual limita a la Ciénaga de Chapala en su porción sur (Figura 1) (Rosas y Urrutia, 1992).

Las manifestaciones termales de Los Negritos se relacionan al cruce de dos fallas, la Falla El Platanal con una dirección este-oeste (paralela a la falla Pajacuarán) y la Falla Los Negritos con dirección noreste-suroeste. La fuente de calor podría relacionarse con una cámara magmática profunda alimentadora del vulcanismo más reciente (Hiriart et al., 2011).

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es conocer la hidrología superficial del sitio y los cambios estacionales de la composición hidroquímica de algunas variables físicoquímicas.

2. Metodología

2.1. Hidrología

El movimiento del agua en las escorrentías depende de las formaciones que caracterizan el relieve en la cuenca. Al analizar la hidrología se pueden determinar los destinos a los cuales los elementos se transportan (Meays et al., 2006).

Para determinar las características que condicionan el transporte del agua, se determinaron los siguientes atributos de cada cuenca: i) Análisis geomorfológico: Área, Perímetro, Coeficiente de compacidad, Coeficiente de elongación, Curva hipsométrica; ii) Determinación de pendientes; iii) Orden y dirección de flujos, y iv) Análisis de precipitación.

Para realizar el análisis geomorfológico de la cuenca se utilizaron como guía los procedimientos propuestos por Campos-Aranda (1992), con apoyo de técnicas de Sistemas de Información Geográfica y la información vectorial disponible del INEGI.

La determinación de pendientes se realizó con una caja de herramientas de Análisis Espacial dentro del SIG empleado. Por otro lado, el orden y dirección de los escurrimientos superficiales se obtuvieron desde el portal de internet Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) de INEGI, el cual es una plataforma en línea en donde se puede visualizar y descargar en formato vectorial las cuencas de todo el país a una escala de 1:50,000.

Para evaluar el ciclo de precipitaciones se obtuvieron datos de la estación climatológica 16141 Yurécuaro, de la Red de Estaciones Climatológicas de CONAGUA, la cual se encuentra a 50 km de

distancia y en una altitud de 1575 msnm, misma que no varía mucho con la zona de Los Negritos.

2.2. Hidroquímica

Los muestreos para caracterizar la hidroquímica se realizaron durante dos ciclos anuales de precipitación (2015-2016), con un total de cuatro muestreos que se efectuaron dos veces al año, una vez en época de secas y otra en época de lluvia.

La metodología para la ubicación de los sitios de muestreo varió en cada año. Durante 2015 se realizó un muestreo sistemático tipo polar de muestras simples, que se eligió con base en las características de la dirección de los vientos. El muestreo partió de la zona en donde se localiza la manifestación hidrotermal y hasta 5 km de diámetro, dividido en gradientes de 1 km cada uno.

Para la toma de muestras del año 2016 se diseñó un plan de muestreo de tipo hidrológico en la zona de estudio. Los criterios para elegir los sitios de muestreo fueron los siguientes:

- Accesibilidad. Las características de cada zona de estudio, como su topografía o densidad de vegetación, a veces hacen imposible llegar a puntos de muestreo que se planean en gabinete, por lo que se verificó en campo la accesibilidad a cada punto propuesto.
- Dirección del flujo. Para caracterizar las concentraciones de los elementos a estudiar, se planteó seguir el curso de los efluentes a fin de conocer qué tanto varían a lo largo del escurrimiento.
- Intersección de corrientes. Se propusieron muestreos en intersecciones para observar cómo varían y desde dónde se pueden observar las concentraciones de los metales.
- Presencia de cuerpos de agua. A lo largo del cauce de una escorrentía se presentan cuerpos de agua, que pueden indicar acumulación de los elementos a analizar.

Se colectaron un total de 54 muestras, de las cuales 13 pertenecen a la primera campaña (marzo 2015, época de secas), 11 a la segunda campaña (octubre 2015, época de lluvias), 16 a la tercera (marzo 2016, época de secas) y las 14 restantes a la cuarta (octubre 2015, época de lluvias).

Durante los muestreos se midieron las variables fisicoquímicas como temperatura, salinidad, pH, potencial de oxidación-reducción (ORP), conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, con el uso del multiparamétrico Hach (HMP6P). En el caso de los nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos) se realizó una medición de la concentración disuelta mediante el uso del colorímetro, el mismo día del muestreo.

Una vez tomado el volumen necesario en campo (150 ml), se trasladaron las muestras en refrigeración ($\sim 4^{\circ}\text{C}$). En el lugar de hospedaje se filtraron las muestras con el uso de un sistema de filtración, una bomba manual de vacío y con filtros de celulosa de $0.45\ \mu\text{m}$ de tamaño de poro.

Las muestras se preservaron en refrigeración ($\sim 4^{\circ}\text{C}$) sin necesidad de acidificarse ni adicionar reactivos, para el posterior análisis de isótopos estables (^2H y ^{18}O), fluoruros, cloruros y sulfatos, en el Laboratorio de Fluidos Geotérmicos del CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica), unidad CICESE. Para la medición de isótopos se utilizó un analizador de isótopos de alta precisión δD y $\delta^{18}\text{O}$, Picarro (L2130-i) y para aniones un sistema de cromatografía iónica Dionex/Thermo Scientific (ICS-5000).

Con relación a los isótopos, para cada muestra se realizaron al menos cinco análisis a fin de asegurar la calidad del resultado. Los resultados se expresan como δD y $\delta^{18}\text{O}$ (‰), conforme a las relaciones que se muestran en la ecuación siguiente:

$$\delta^{18}O = \frac{(^{18}O/^{16}O)_{muestra} - (^{18}O/^{16}O)_{SMOW}}{(^{18}O/^{16}O)_{SMOW}} \times 1000\text{‰}$$

$$\delta D = \frac{(D/H)_{muestra} - (D/H)_{SMOW}}{(D/H)_{SMOW}} \times 1000\text{‰}$$

Cuando se obtuvieron los resultados de cada parámetro medido, se realizaron interpolaciones en SIG con la técnica de interpolación de distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) dentro de la caja de herramientas de análisis espacial. La función IDW funciona a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos muestra. En este caso son los puntos de muestreo y los resultados obtenidos en cada punto.

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación de la hidrología y ciclo de precipitación

La cuenca hidrológica a la que pertenece Los Negritos se conoce como R. Sahuayo (RH12Da), la cual pertenece a la Región Hidrológica 12 Lerma-Santiago, dentro de la cuenca del Lago Chapala. La cuenca RH12Da tiene un perímetro de 159.72 km, con una superficie de 968.13 km², lo que la clasifica como pequeña, según las categorías de Campos-Aranda (1992). La forma de la cuenca se distingue por un coeficiente de compacidad de 1.45 y la relación de elongación de 0.86, lo que representa una forma más cercana a la circular y de relieves bajos (Figura 2).

Es una cuenca de tipo valle, erosionada, con pendientes suaves en el área de las manifestaciones, con una dirección de flujo de SE a NO. La mayoría de las corrientes han sido canalizadas y se utilizan para el riego de campos agrícolas, llegando al Río Sahuayo que fluye hasta el Lago de Chapala, en el estado de Jalisco. Con relación a la curva hipsométrica se puede observar que es una cuenca de valle o erosionada, dominando las partes bajas, como se puede observar en la Figura 3.

Las pendientes predominantes en la cuenca son de 0 a 15° (Figura 2), lo que indica velocidades bajas de flujo. La longitud del cauce principal es de 39.69 km. El perfil topográfico del cauce principal, muestra que no existen grandes variaciones de la pendiente a lo largo del cauce, teniendo una mayor pendiente cuenca arriba, que va de los 1540 a los 1570 msnm.

Con respecto a la información de la precipitación mensual (Figura 4), en el año de 2015 y 2016 se presentaron ciclos normales de precipitación, según la información histórica. Las precipitaciones mayores ocurrieron durante los meses de junio a octubre. Durante el período de lluvias, en el año 2016 se presentaron precipitaciones más bajas que el promedio, al igual que en 2015 excepto por el mes de junio que excede el doble del promedio (232.5 mm).

En el mes de enero se presentaron precipitaciones por debajo del promedio en ambos años, siendo el año 2016 el que presenta mayor precipitación aunque apenas alcanza la mitad del promedio. En el mes de febrero los datos de 2016 no se encontraron disponibles en la estación meteorológica, pero durante 2015 en este mismo mes se presentaron lluvias parecidas al promedio. Los escenarios de precipitación más parecidos al ciclo histórico fueron durante los meses de abril, noviembre y diciembre.

Se presentó una condición atípica durante el mes de marzo de 2015, con una precipitación de 115.5

mm, siendo el promedio mensual de 10.03 mm. El año 2015 se clasificó como el 12° año más lluvioso desde 1941 a nivel nacional, reportándose lluvias extraordinarias en el mes de marzo en Aguascalientes, Coahuila, Colima, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelia, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas. Marzo destacó como el mes más lluvioso a nivel nacional (CONAGUA, 2015a).

Durante marzo se presentaron dos tormentas invernales, cuatro frentes fríos y la entrada de humedad desde el Pacífico en el país. El evento que fue el causante de la anomalía de precipitación comentada en ese mes, fue el frente frío No. 41 que ingresó al país por el norte el día 4 (CONAGUA, 2015b).

En la Figura 4 también se puede observar también que durante el mes de mayo de 2015 se presentó una precipitación de 73.6 mm, que representa un valor por arriba del promedio (27.84 mm).

3.2 Isótopos estables

Los isótopos estables del agua (^2H y ^{18}O) son añadidos naturalmente en la cuenca por la lluvia y eventos de deshielo, y se pueden utilizar para identificar diferentes masas de aire y agua que contribuyen a la precipitación de una cuenca. Esto se debe a que las variaciones isotópicas cambian a través de los procesos de fraccionamiento de mezcla, que ocurren durante la evaporación y condensación, por lo que se puede determinar cuál es el origen del agua que entra a la cuenca (McGuire y McDonnell, 2006).

La relación isotópica del δD y $\delta^{18}\text{O}$ en las cuatro temporadas de muestreo (Figura 5) muestra una tendencia lineal parecida, lo cual indica que el agua que se muestreo está mayormente caracterizada por la precipitación y evaporación de la zona, es decir que la composición isotópica es característica de agua superficial en ambientes áridos y no existe evidencia de procesos de intercambio de ácido sulfhídrico, hidratación de silicatos, aguas termales, intercambio de CO_2 , intercambio de rocas o condensación.

Durante la temporada de marzo 2016 se observan concentraciones más elevadas, lo que puede deberse a que durante esta campaña no ocurrieron lluvias y fue la más seca de todos los muestreos.

Los puntos tomados en la manifestación termal y en las fosas de alrededor son los correspondientes a los números 1 y 2. El número 1 se encuentra con valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -6.47 a -3.78, siendo este último el correspondiente a la campaña número 4. La muestra número 2, sólo se tomó durante las primeras dos campañas, y se puede observar un valor de $\delta^{18}\text{O}$ que va desde -2.96 a -1.5 (Figura 5).

3.3 Parámetros de campo y nutrientes

En esta sección se presentan los resultados más relevantes encontrados en los parámetros fisicoquímicos de campo y nutrientes.

Durante las cuatro campañas, el pH permaneció con valores de 6.82 a 8.84 (Figura 6), lo que indica muestras alcalinas y neutras. Si bien durante las primeras tres campañas el pH se mantiene con valores más cercanos a concentraciones neutras, durante la campaña de octubre de 2016 se aprecian valores cercanos a concentraciones alcalinas.

El pH cerca de la zona de las manifestaciones durante las cuatro campañas de muestreo se presenta sin variaciones. Así, el pH típico de los volcanes de lodo es de 7.45 en promedio.

Los ambientes de óxido-reducción en la zona de estudio se relacionan con las fluctuaciones observadas en el ORP, que presentan valores de -263 a 255 mV (Figura 6). En las primeras dos campañas de muestreo se observan valores mayormente positivos (-263 a 255 mV, promedio: 75.42), que implican ambientes que favorecen a la oxidación. En el caso de las últimas dos campañas se presentaron valores de -185 a 82 mV (promedio: -25.6), lo que favorece los procesos de reducción.

En relación a la conductividad eléctrica, ésta varió entre 15.97 y 5,560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ durante las cuatro campañas, con los valores más altos cerca de la manifestación termal. Se detectó un aumento de la conductividad durante la última campaña, alcanzando 5,560 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el punto 27, mismo que durante la campaña de marzo 2016 también presentó un valor alto (4,969 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esto se puede deber a un aporte de sedimentos de la zona de El Platanal que se encuentra al oriente de la zona de estudio (Figura 7).

En la Figura 8 se muestran los valores de nutrientes obtenidos durante las cuatro campañas de muestreo. En el caso de los nitritos se observan valores casi nulos, con un valor promedio de 0.0081 mg/l, mientras que los nitratos presentan un promedio de 3.87 mg/l (máximo 28 y mínimo 0 mg/l). Esto se debe a la rápida conversión de los nitritos a nitratos. El valor máximo de nitratos se observó en la zona noreste, a una distancia de 3 kilómetros aproximadamente.

Los fosfatos por otra parte presentan valores que van de los 0 a 14 mg/l y son menos abundantes en proporción a los nitratos. Los valores más altos se obtuvieron durante la campaña de marzo de 2015, uno sobre un canal al norte de la zona de estudio y otro cerca de la manifestación de lodos calientes, también sobre un canal, pero al oriente de la manifestación.

3.5 Aniones

Los fluoruros tienen concentraciones muy bajas, de 0.4 a 24.26 ppm, en casi todos los puntos de muestreo (Figura 9). Durante la campaña de octubre de 2015 se observan las concentraciones mayores en los puntos cercanos a la manifestación termal. Durante los muestreos de época de secas se aprecian los valores más altos de fluoruros.

En relación con la concentración de cloruros, en la Figura 10 se observa que las concentraciones mayores en todas las campañas se asocian a la manifestación termal. Las concentraciones van de las 0.93 a las 1257.92 ppm, con un promedio de 145.74 ppm.

Los sulfatos presentan una concentración de entre 2.26 a 4908.22 ppm (Figura 11). La concentración mayor se aprecia durante las primeras dos campañas de muestreo, en 2015, si bien durante este año se pueden asociar estas concentraciones a la manifestación. En 2016 se observa una concentración mayor en una zona al oriente y en la cercanía de la manifestación, en los puntos 25 y 27.

4. Conclusiones

La cuenca hidrológica en la zona de estudio presenta relieves bajos y pendientes suaves, por lo que el movimiento del agua es lento, lo mismo que el movimiento de sus componentes.

Durante 2015 y 2016 ocurrió un ciclo normal de precipitaciones, aunque resalta una condición atípica durante el mes de marzo de 2015. Los resultados isotópicos demuestran que el agua que se muestreó y analizó estuvo fuertemente influenciada por los procesos de evaporación y precipitación en la zona.

Los parámetros de campo y los nutrientes indican que las actividades antropogénicas que se realizan

en las cercanías pueden interferir con las concentraciones de esos mismos nutrientes.

Si bien existen diversas fuentes de cloruros, tales como los procedentes de contaminantes domésticos y de riegos agrícolas, las concentraciones de cloruros que se obtuvieron en este estudio se asocian a las manifestaciones termales. Así se infiere del hecho de que los resultados mayores se obtuvieron durante la campaña de octubre de 2015 (época de lluvia). En este periodo la precipitación fue de 92.3 mm y durante marzo de ese mismo año fue de 115.5 mm. La distribución durante época de lluvia se concentra cerca de la zona geotérmica, pero como no existe mucha velocidad de transporte se presentan ahí las mayores concentraciones.

En cuanto a los resultados de cloruros y sulfatos, hay evidencias de un aporte externo a la manifestación termal, al menos en el muestreo de octubre de 2016, donde cloruros y sulfatos presentan el mismo comportamiento. Ello podría asociarse a las actividades antropogénicas en la comunidad de El Platanal, que a su vez son influenciadas por un ciclo anual.

La distribución de los fluoruros muestra dos tendencias: mientras que durante el muestreo de octubre de 2015 hay una mayor concentración en la zona termal, durante octubre de 2016 se observan bajas concentraciones.

Las interacciones del agua superficial con el medio hacen variar su composición, lo mismo que los ciclos de precipitación. Por ello, al realizar estudios de hidroquímica es importante evaluar las estacionalidades para observar si existen procesos de evaporación que concentren elementos o compuestos a estudiar, o viceversa.

5. Referencias

- Breña Puyol, A.F. y M.A. Jacobo Villa, 2006. *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. 289 p.
- Campos-Aranda, D.F., 1992. *Procesos del Ciclo Hidrológico*, 2da. reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 524 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015a. Reporte del Clima en México. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. México. 30 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015b. Reporte del Clima en México. Marzo 2015. Año 5, Número 3. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. Gerencia de Meteorología y Climatología. Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. 23 p.
- Drever, J., 1997. *The Geochemistry of Natural Waters. Surface and Groundwater Environments*, 3rd Edition. Prentice Hall, USA, 436 p.
- Hiriart Le Bert, G., L.C.A. Gutiérrez Negrín, J.L. Quijano León, A. Ornelas Celis, S. Espíndola e I. Hernández, 2011. *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. México, DF, Mayo de 2011.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1982a. Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales F1312. Escala 1:250,000. Serie I.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1982b. Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1303. Escala 1:250,000. Serie I.

Lund, J. W., 2007. Characteristics, development and utilization of geothermal resources. Oregon Institute of Technology. *GHC Bulletin*, June 2007. 9 pp.

McGuire, K., and J. McDonnell, 2007. Stable isotope tracers in watershed hydrology. In: Michener, R. and Lajtha, K. (Eds.), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 2nd ed. Blackwell Publishing, Australia, pp. 334-374.

Meays, C., K. Broersma, R. Nordin, A. Mazumder, and M. Samadpour, 2006. Spatial and annual variability in concentrations and sources of *Escherichia coli* in multiple watersheds. *Environ. Sci. Technol.*, 42 (40), pp. 5289-5296.

Rosas Elguera, J. y J. Urrutia-Fucugauchi, 1992. Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares. *Geofísica Internacional*, 31(4), pp. 431-442.

FIGURAS

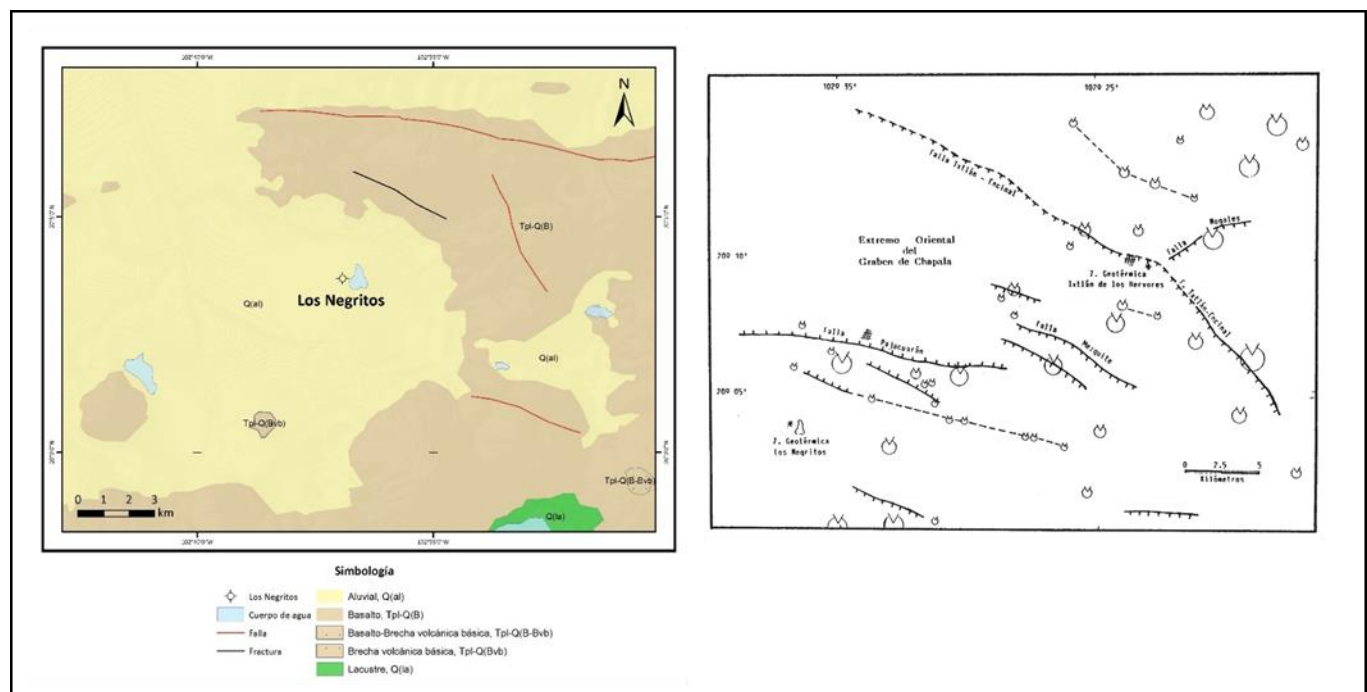


Figura 1. Izquierda: Litología en la zona de estudio. Derecha: Sistema de fallas, conos volcánicos y lineamientos presentes en las zonas geotérmicas de Ixtlán de Los Hervores y de Los Negritos (tomado de Rosas y Urrutia, 1992).

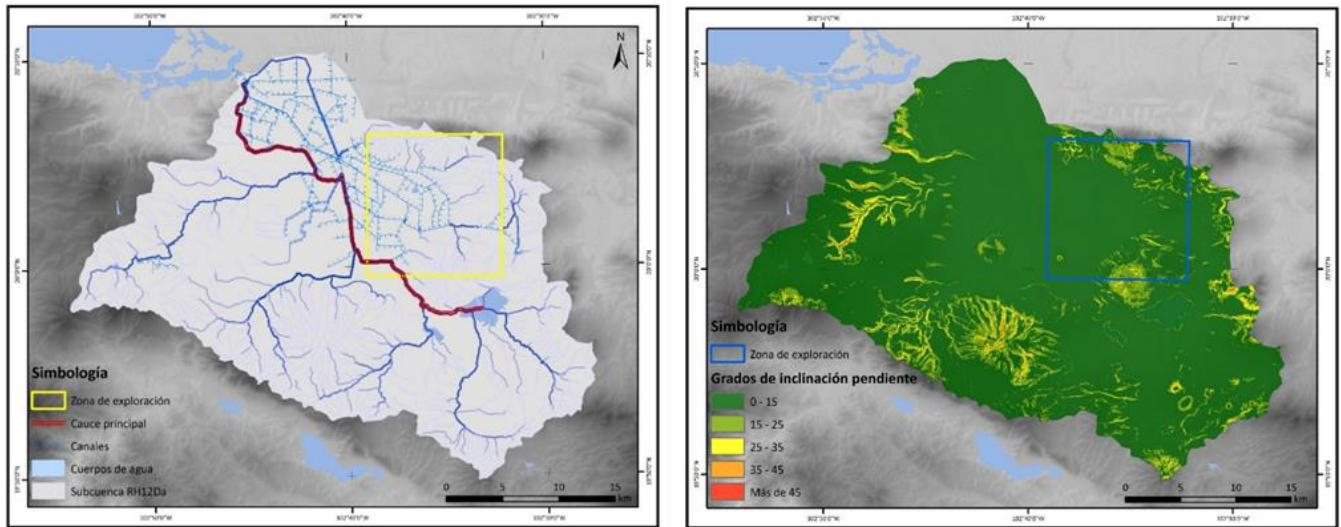


Figura 2. Cuenca hidrológica RH12Da (izquierda) y grado de inclinación de pendientes (derecha).

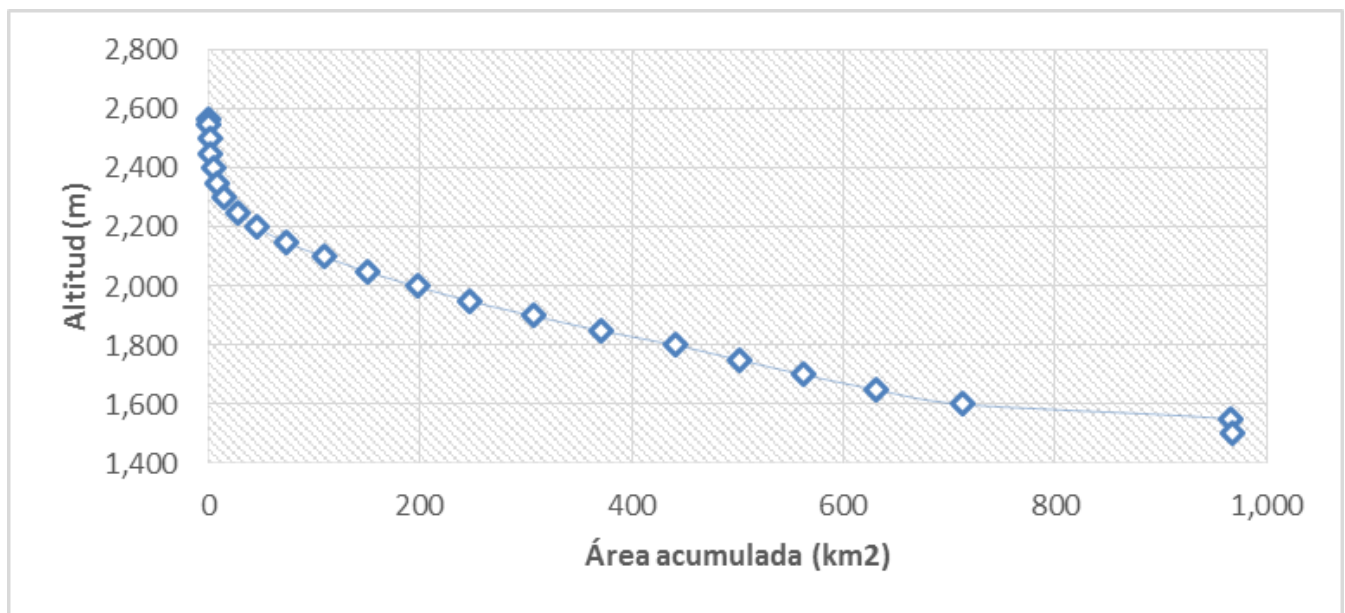


Figura 3. Curva hipsométrica de la cuenca RH12Da.

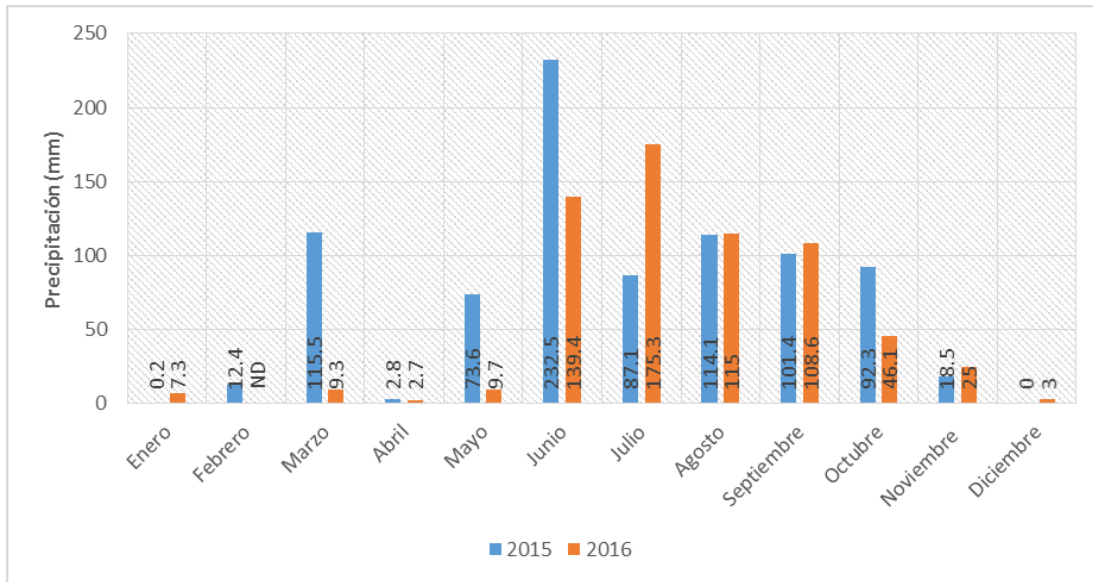


Figura 4. Precipitación mensual acumulada durante los años 2015 y 2016.

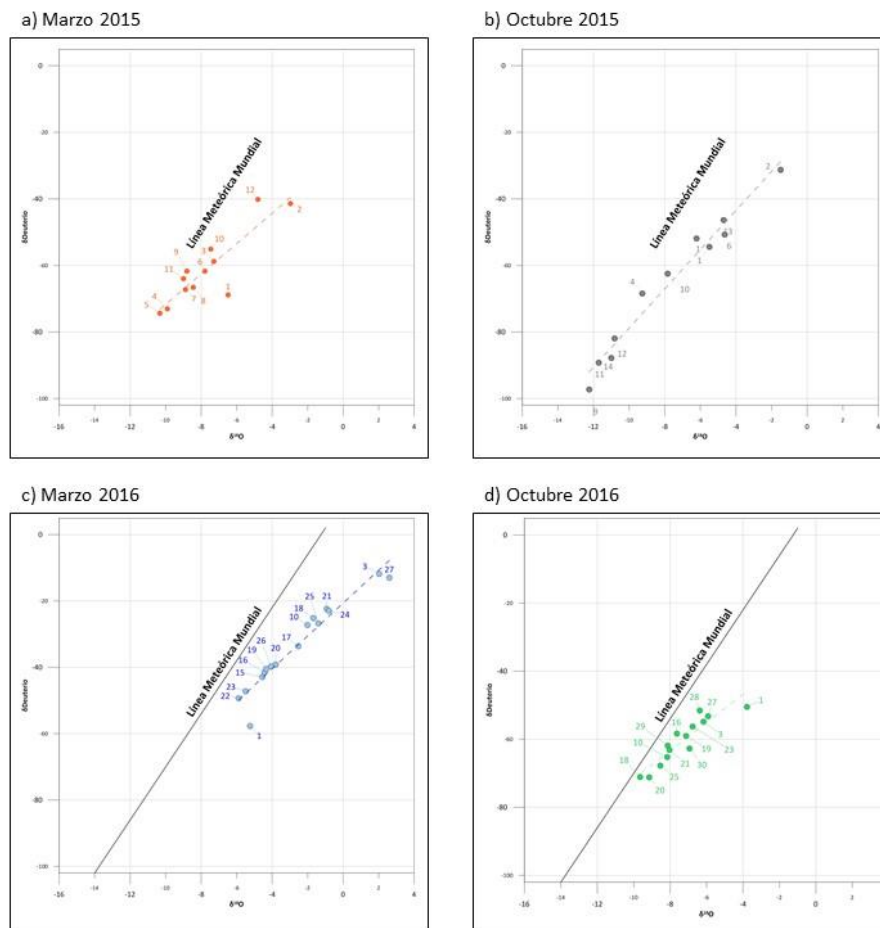


Figura 5. Relación isotópica de δD y $\delta^{18}O$ en las cuatro temporadas de muestreo.

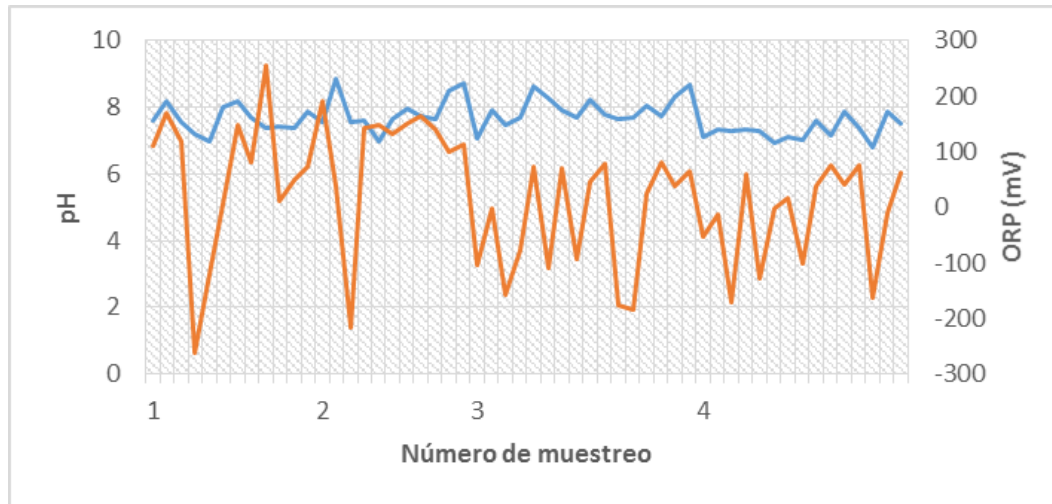


Figura 6. Resultados de pH y ORP durante las cuatro temporadas de muestreo.

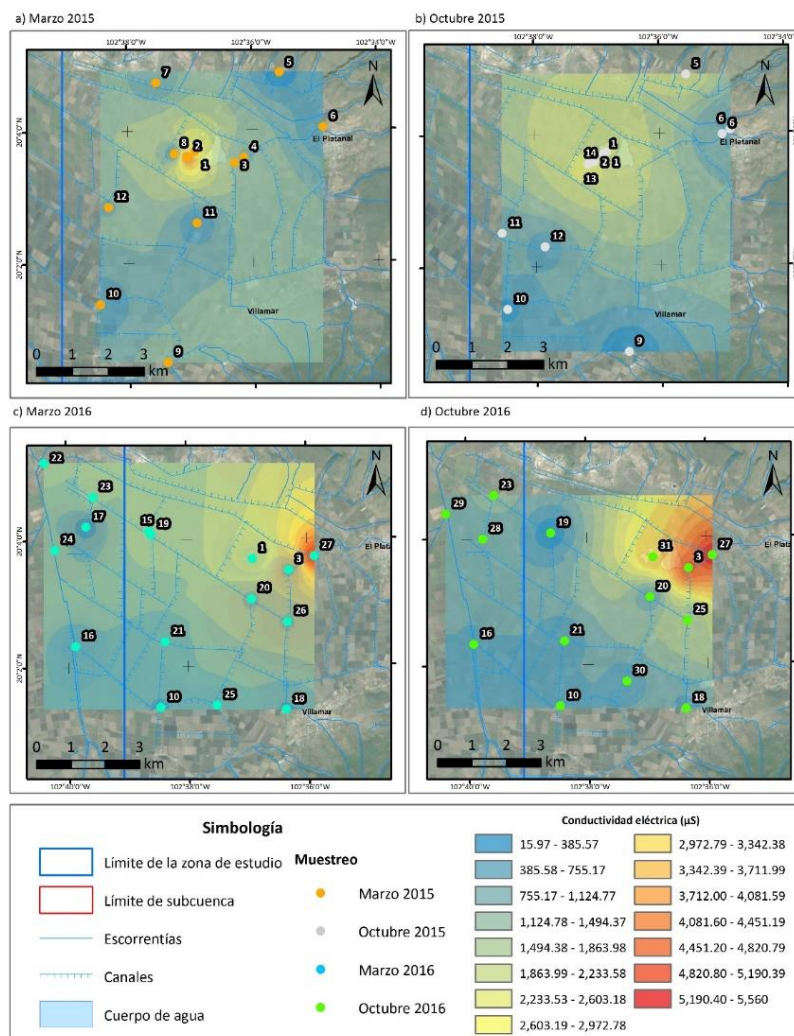


Figura 7. Conductividad eléctrica en las campañas de muestreo.

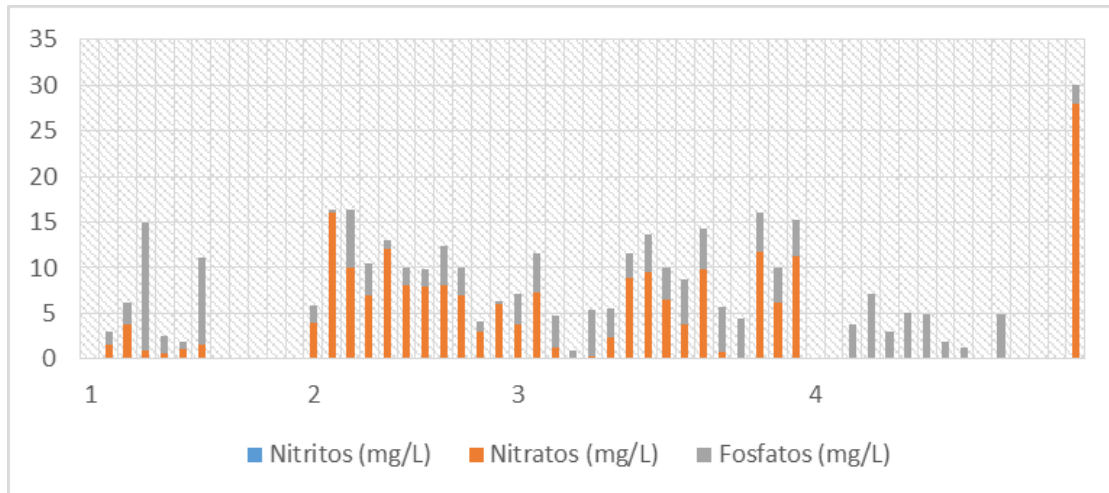


Figura 8. Nutrientes durante las campañas de muestreo.

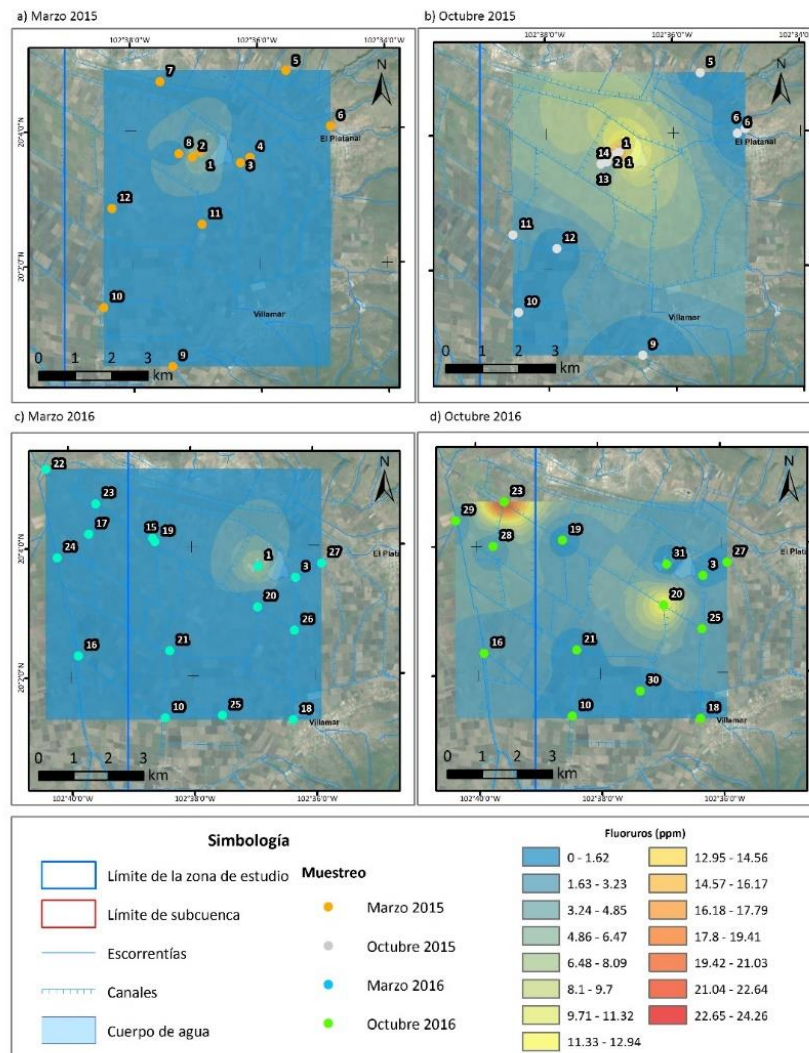


Figura 9. Concentración de fluoruros durante las cuatro campañas de muestreo.

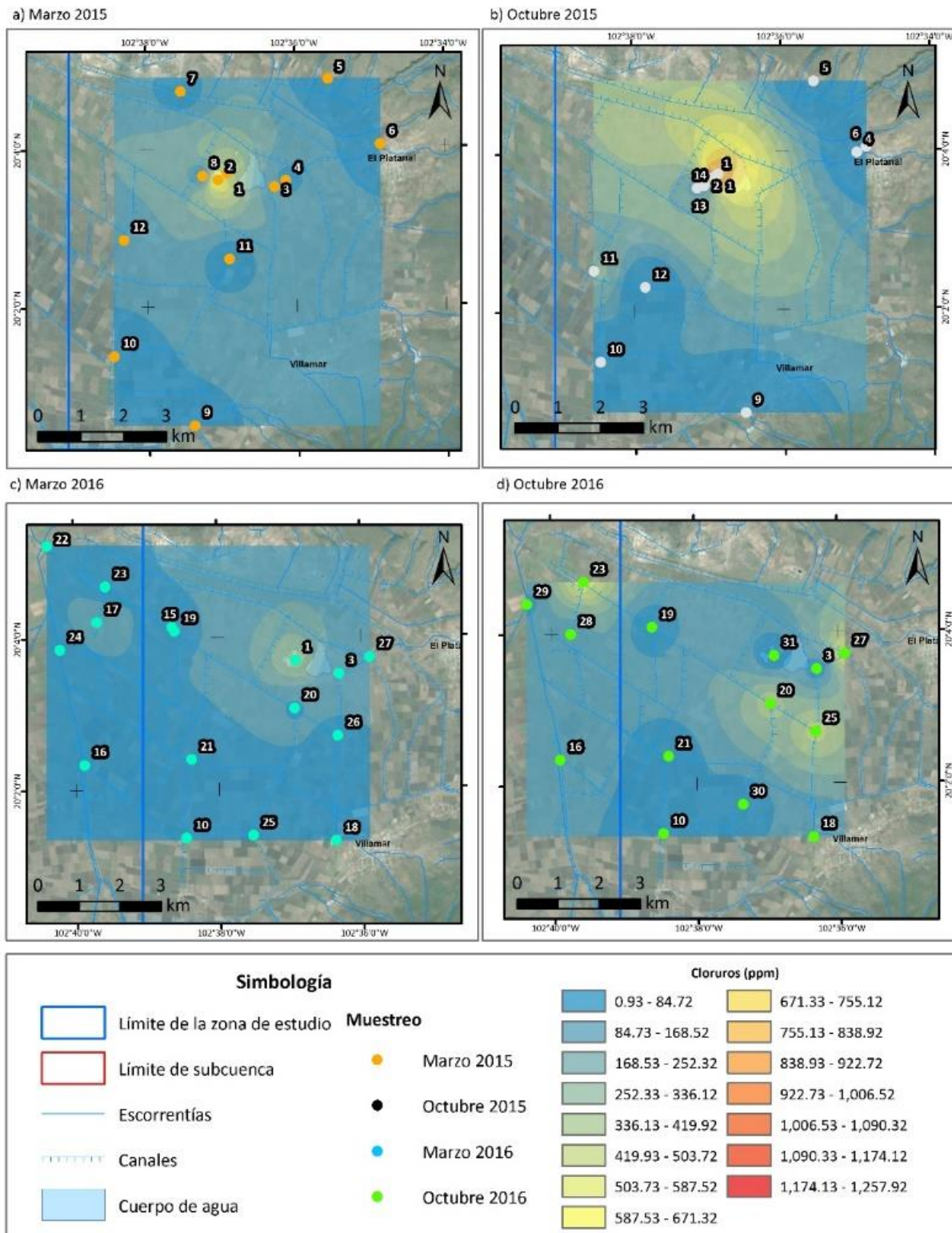


Figura 10. Cloruros presentes en la zona de estudio.

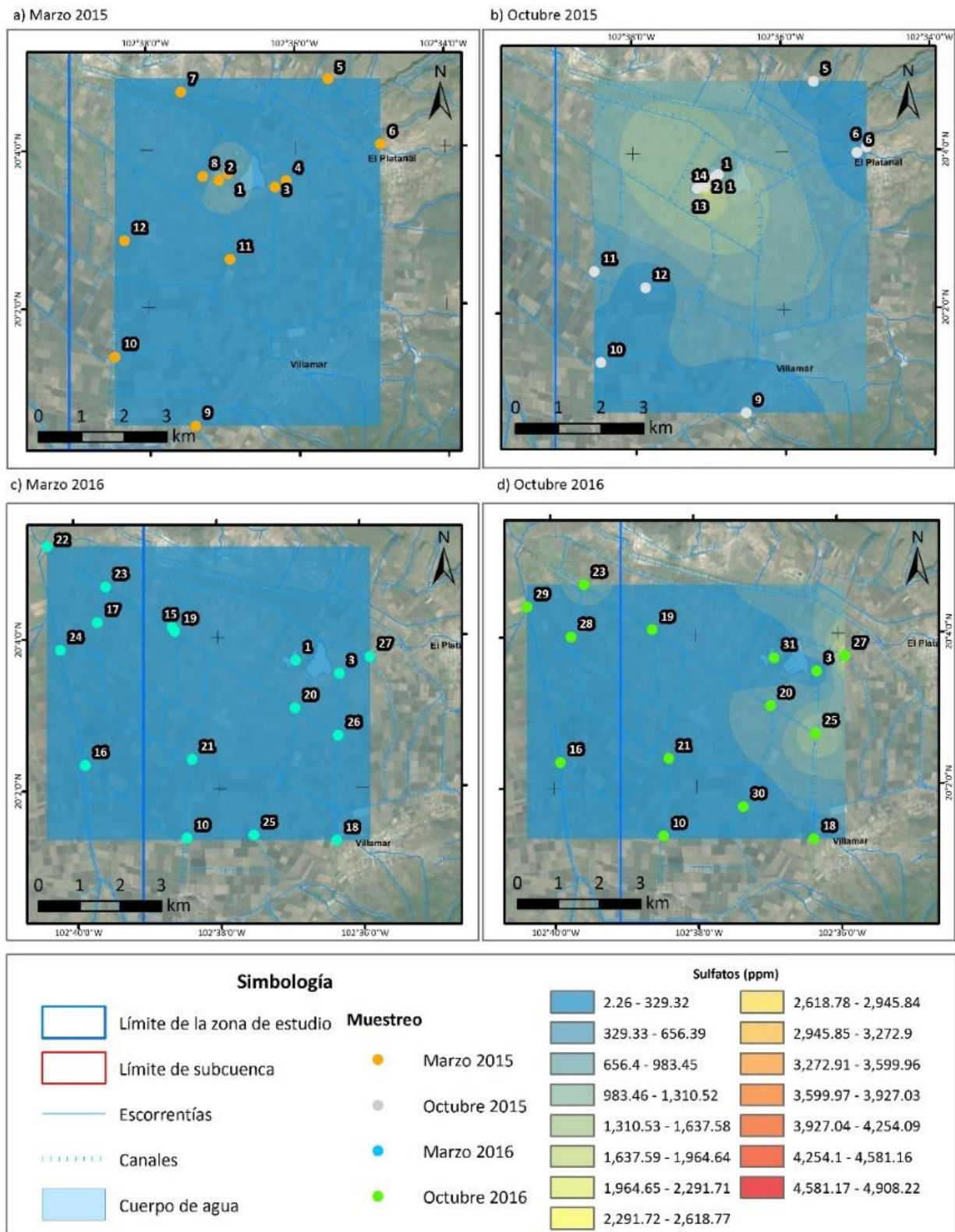


Figura 11. Sulfatos presentes en la zona de estudio