

CALIDAD DEL AGUA POTABLE EN LA CIÉNAGA DE CHAPALA, MICHOACÁN, MÉXICO

• Martha A. Velázquez-Machuca •
CIIDIR-IPN-Michoacán, México

• José Luis Pimentel-Equihua •
Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México

Resumen

Con el objetivo de evaluar el grado de contaminación de las fuentes de agua potable en la Ciénaga de Chapala, Michoacán, México, se seleccionaron 17 sitios (manantiales y pozos) en los municipios de Villamar, Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza y Cojumatlán en tres fechas de muestreo durante abril y diciembre de 2008, y mayo de 2009. Los parámetros de calidad del agua analizados fueron pH, temperatura, CE, Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , metales totales (Fe, Mn, Pb, Cd) y disueltos (Fe, Mn, Pb, Cd, As, Zn), B, P total y coliformes fecales. Los datos se procesaron usando análisis estadístico multivariado y calculando un índice de calidad de agua (ICA) para cada sitio y fecha de muestreo. Los resultados mostraron que los parámetros que excedieron los límites permisibles para agua de uso y consumo humano fueron el B, Cd, Pb y coliformes fecales. Los principales factores asociados con la calidad del agua fueron los flujos geotérmicos, el intemperismo de los minerales silicatados y carbonatados, y la infiltración de flujos superficiales contaminados. Se detectaron cuatro agrupamientos de los pozos y manantiales que se asociaron a dos tipos de acuíferos. En relación con el ICA, el 96% de las fuentes de agua mostró buena y moderada calidad, y el 4% restante, agua de baja calidad. Los niveles de metales pesados (Pb, Cd) detectados indican la necesidad de realizar monitores sistemáticos sobre tales elementos para plantear medidas adecuadas de manejo de estas fuentes y, con ello, reducir peligros potenciales sanitarios en las poblaciones que hacen uso de dichos flujos.

Palabras clave: contaminación del agua, índice de calidad del agua, análisis multivariado, metales pesados.

Introducción

El agua subterránea ha sido considerada como una forma de agua pura (Izquierdo *et al.*, 2008) debido a que contiene en general poca materia orgánica y una baja concentración de microorganismos patógenos como consecuencia de su infiltración a través de potentes espesores de rocas y suelos, además de su elevado tiempo de residencia en el acuífero. Estas características han favorecido la explotación intensiva del agua subterránea tanto para uso y consumo humano como en aquellas actividades antrópicas donde es necesaria una buena calidad de los flujos. En nuestro país,

se reconoce que el uso incontrolado del agua subterránea ha causado la sobreexplotación del 15% de los acuíferos (Conagua, 2010), lo que pone en riesgo la disponibilidad futura de estas fuentes de agua. Esta sobreexplotación causa, además, un efecto negativo en la calidad del agua debido a que los flujos extraídos a profundidades cada vez mayores son regularmente de elevada concentración salina y pueden contener elementos tóxicos (Custodio y Llamas, 1983; Carreón-Freyre *et al.*, 2005).

En La Ciénaga de Chapala, Michoacán, las aguas subterráneas son la principal fuente de agua para uso y consumo humano, así como para riego agrícola y como alimento de ganado.

En la zona se extraen unos 77 hm³/año y la recarga se ha calculado en 14 hm³/año, lo que da como resultado una sobreexplotación del acuífero (relación extracción/recarga de 5.5) (Aguillón *et al.*, 2005). A la fecha no se cuenta con datos hidroquímicos sistemáticos que indiquen el estado que guarda la calidad del agua utilizada para uso y consumo humano en la zona, y la variación estacional y temporal en la composición química, aspectos de relevancia para el manejo integral del recurso, si se considera su condición de acuífero sobreexplotado.

El objetivo del trabajo fue caracterizar la composición química y microbiológica del agua para uso y consumo humano en la Ciénaga de Chapala y evaluar su calidad, utilizando análisis estadístico multivariado y un índice de calidad del agua (ICA) para estos usos.

Materiales y métodos

Zona de estudio y sitios de muestreo

Comprendió la porción Michoacán de la subcuenca 3 Chapala o Ciénaga de Chapala (en adelante, CCM), de la cuenca Lerma-Chapala y provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, conforme la delimitación establecida por Sotelo (2005). En la zona afloran varios tipos de rocas volcánicas del Terciario y Cuaternario, y los valles se han conformado por depósitos aluviales del Cuaternario. La zona está ubicada al noroeste del estado de Michoacán, México, entre las coordenadas 20° 03' y 20° 10' de latitud norte y los 102° 10' y 102° 40' de longitud oeste, con una altura media de 1 523 msnm. Administrativamente incluyó los municipios de Villamar, Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza y Cojumatlán.

Para el estudio se seleccionaron 17 sitios de muestreo correspondientes a manantiales y pozos profundos (figura 1): 1) manantial Los Negritos, 2) manantial Zapata poblado, 3) manantial Zapata molino, 4) pozo Totolán I, 5) pozo Totolán II, 6) pozo La Lobera I, 7) pozo

La Lobera II, 8) manantial Zalate, 9) Fuente Zalate, 10) pozo La Palma, 11) manantial Flor de Agua I, 12) manantial Flor de Agua II, 13) pozo Valle Verde, 14) pozo Aramburo, 15) pozo Jacarandas, 16) pozo Real Victoria y 17) pozo Yerbabuena.

Aunque los flujos del manantial Los Negritos no se usan para consumo humano, se tomó este sitio como referencia de la calidad del agua subterránea debido a su influencia geotérmica; los puntos 2 y 3 corresponden a los manantiales ubicados en el poblado de Emiliano Zapata, el primero de los cuales es de uso urbano. Los pozos Totolán I, Totolán II, La Lobera I y La Lobera II son de uso urbano en los poblados de Jiquilpan y Totolán. El manantial Zalate nace en una barranca del cerro de San Francisco y sus flujos son utilizados para uso y consumo humano en Jiquilpan. El pozo La Palma surte al poblado del mismo nombre, situado en el borde del lago de Chapala. Los manantiales Flor de Agua I y II surgen en la orilla izquierda del río Sahuayo, a unos 2 km aguas arriba de la ciudad de Sahuayo. Finalmente, los pozos Valle Verde, Aramburo, Jacarandas, Real Victoria y Yerbabuena dan abasto de agua potable a la ciudad de Sahuayo.

Toma de muestras y análisis físico-químicos y bacteriológicos

Se tomaron muestras de agua de los sitios seleccionados en tres fechas de muestreo (2 de abril del 2008, 4 de diciembre del 2008 y 24 de mayo del 2009), las cuales se colocaron en recipientes de polipropileno de un litro de capacidad, previamente lavados con agua acidificada, y se trasladaron al laboratorio del CIIDIR-IPN-Michoacán, donde fueron almacenadas a 4 °C.

Los análisis físico-químicos y bacteriológicos, así como su metodología fueron los siguientes: pH y temperatura, en potenciómetro marca Orion; CE, en conductímetro marca Orion; Cl⁻, por precipitación; CO₃²⁻ y HCO₃⁻, por titulación con ácido; SO₄²⁻, por precipitación con cloruro de bario; Ca²⁺ y Mg²⁺, por

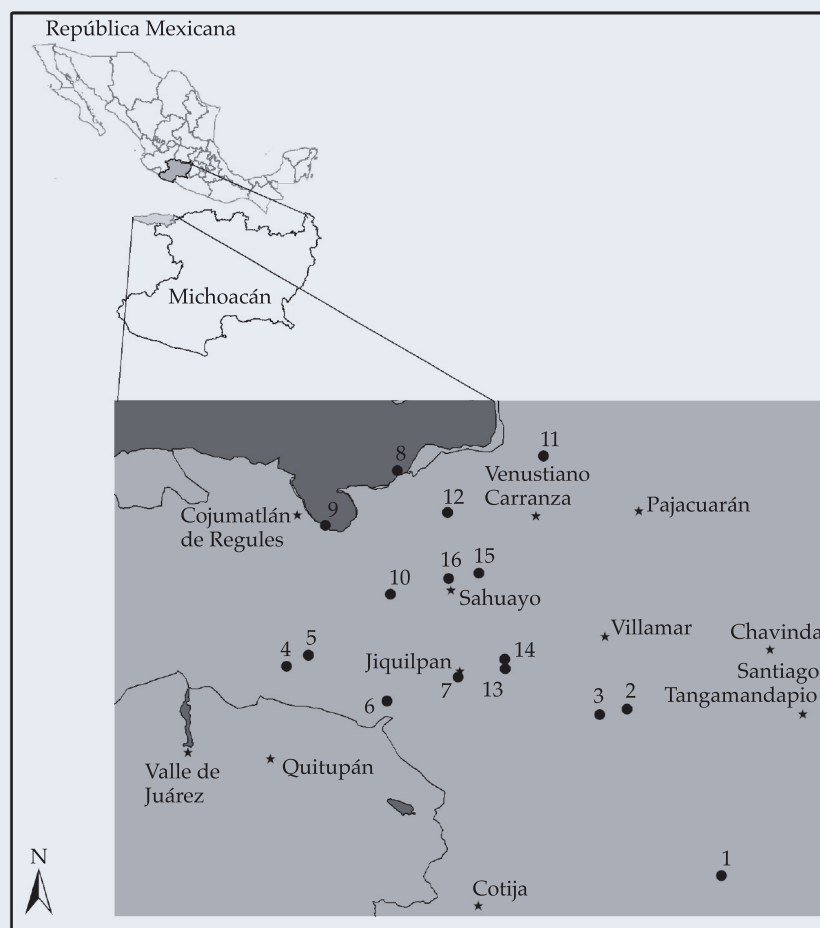


Figura 1. Sitios de muestreo de pozos y manantiales en la Ciénaga de Chapala.

espectroscopía de absorción atómica (AA); Na^+ y K^+ , por emisión de flama; metales pesados totales (Fe, Mn, Pb y Cd) extractados en mezcla de ácidos $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$ y analizados por espectroscopía de absorción atómica (EAA); B, método de la curcumina; P total extractado con persulfato y determinado por el método del ácido ascórbico (Eaton *et al.*, 2005); coliformes fecales, método del número más probable (Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994). Los metales disueltos (Fe, Mn, Pb, Cd, Cu y As) fueron analizados por plasma acoplado inductivamente (ICP-EAA) en el laboratorio "Salvador Alcalde Blanco" del Colegio de Postgraduados y correspondieron únicamente

al muestreo de diciembre de 2008. Esto, con la finalidad de confirmar los datos de metales pesados totales determinados por EAA.

Con los datos de iones mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) se determinaron las relaciones iónicas, familias de agua y la relación de adsorción de sodio (RAS). Esta última se calculó con la ecuación (Ayers y Westcot, 1989):

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Donde las concentraciones de Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se encuentran en meq l^{-1} .

Análisis estadístico

Se realizó una descripción estadística de los valores obtenidos utilizando los valores de rango, media y desviación estándar. Se utilizó el análisis multivariado del tipo Análisis de Componentes Principales (ACP) y Cluster Jerárquico Ascendente (CJA) para agrupar los parámetros de calidad de agua y los sitios de muestreo, respectivamente. Los datos fueron procesados en el programa XLSTAT (Addinsoft, Inc., 2009).

Índice de calidad del agua (ICA)

Se calculó un índice de calidad de agua (ICA) para cada uno de los sitios y fechas de muestreo. El ICA fue determinado mediante el método de normalización y suma de los valores de los parámetros de calidad de agua (Tsegaye *et al.*, 2006), medidos en cada sitio y fecha de muestreo.

Los datos de los parámetros individuales de calidad del agua (PCA_x) fueron normalizados (PCA_i) en relación con el valor máximo ($PCAmáx$) de cada parámetro, $PCA_i = (PCA_x / PCAmáx^{-1})$. Sumando todos los PCA_i 's y dividiendo entre su número total, se calculó el índice de calidad de agua. La expresión es:

$$ICA = \sum_{x=1}^n [(PCA_x)(PCAmáx^{-1})] \times n^{-1}$$

Resultados y discusión

Generalidades

El pH fue de ligeramente ácido a alcalino. La CE mostró una amplia variación, dibujando una zona con extremos de salinidad muy marcados (cuadro 1), con clases de agua de baja a alta concentración (Ayers y Westcot, 1989). La relación de adsorción de sodio mostró un valor medio bajo (< 15), donde los extremos ($RAS = 45.7$ y 0.1) correspondieron al manantial Los Negritos (muestreo en abril de 2008) y el pozo La Lobera II (muestreo en

mayo de 2009), respectivamente. El alto RAS en el agua del manantial Los Negritos indica un enriquecimiento con Na^+ , cuyo origen son los flujos geotérmicos existentes en la zona y que son continuidad del área geotérmica de Ixtlán de Los Hervores (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007). Los metales pesados totales determinados por absorción atómica (EAA) mostraron una distribución relativamente uniforme (bajo valor de la desviación estándar), mientras que el B, P, iones mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), C.F. y metales totales disueltos (ICP-EAA) presentaron mayor variación en sus concentraciones que aquéllos.

El bajo valor de la desviación estándar podría indicar que el origen de los metales pesados totales es un material común en las fuentes de agua analizadas.

En el caso de los metales disueltos, la variación en su concentración se explica por las condiciones físico-químicas a que está sujeta cada fuente de agua y las propiedades de los elementos que determinan su disolución; factores como el pH y las condiciones de óxido-reducción juegan un papel determinante en la disolución de los minerales y en la concentración de las especies químicas en el agua (Stumm y Morgan, 1996).

La variación en la composición química del agua se debe a que los pozos están sujetos a una mezcla de fluidos de dos o más acuíferos en la zona de estudio; la menor concentración electrolítica del agua de manantiales y pozos indica, por otra parte, una recarga relativamente reciente de agua meteórica (Izquierdo *et al.*, 2008).

Tipos de agua

La relación de los cationes mayores (base equivalente-carga) en las muestras de agua dio como resultado el 47% de composición cálcico, cálcico-magnésico y mixto, y 25% como sódico y sódico-magnésico. En relación con la composición aniónica, 86.3% del total de las muestras analizadas fue bicarbonatada, 5.9% clorhídrica, 3.9% bicarbonatada-clorhídrica

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los parámetros físico-químicos y bacteriológicos analizados.

Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Media	DE ¹
pH		6.26	8.02	7.37	0.41
°t	°C	20.0	29.0	25.5	2.7
CE	mS cm ⁻¹	41.1	4 450	840.2	901.4
SDT	mg l ⁻¹	43.0	2 696.5	596.0	550.7
RAS	meq l ⁻¹	0.1	45.7	3.7	9.0
Ca ²⁺	meq l ⁻¹	0.04	15.3	1.93	2.20
Mg ²⁺	meq l ⁻¹	0.05	6.47	2.12	1.63
Na ⁺	meq l ⁻¹	0.07	36.8	3.51	6.95
K ⁺	meq l ⁻¹	0.02	8.81	0.72	1.31
CO ₃ ²⁻	meq l ⁻¹	nd	13.5	0.41	2.00
HCO ₃ ⁻	meq l ⁻¹	0.42	10.16	4.93	2.62
Cl ⁻	meq l ⁻¹	nd	29.04	1.99	5.31
SO ₄ ²⁻	meq l ⁻¹	nd	5.75	0.82	1.41
Fe ²	mg l ⁻¹	nd	0.13	0.04	0.06
Mn ²	mg l ⁻¹	nd	0.27	0.04	0.09
Pb ²	mg l ⁻¹	nd	0.13	0.05	0.05
Cd ²	mg l ⁻¹	nd	0.10	0.04	0.05
B	mg l ⁻¹	nd	9.83	0.61	2.10
P	mg l ⁻¹	nd	2.14	0.18	0.49
CF ³	NMP/100 ml	2	460	29	76
Fe ⁴	µg l ⁻¹	100.0	159.0	111.8	13.5
Zn ⁴	µg l ⁻¹	nd ⁵	49.0	87.5	38.8
Mn ⁴	µg l ⁻¹	nd	15.0	2.8	4.1
Pb ⁴	µg l ⁻¹	nd	92.0	44.2	28.1
Cd ⁴	µg l ⁻¹	nd	nd	nd	nd
Cu ⁴	µg l ⁻¹	48.0	92.0	72.3	14.0
As ⁴	µg l ⁻¹	nd	nd	nd	nd

¹DE = desviación estándar; ²metales totales por EAA; ³CF = coliformes fecales; ⁴metales disueltos por ICP-EAA; ⁵nd = no detectable por el método utilizado.

y 3.9% sulfatada-bicarbonatada. El agua de composición bicarbonatada tiene un origen meteórico (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007), mientras que la clorhídrica tiene influencias geotérmicas; finalmente, la mezcla de flujos de estos orígenes da lugar a la composición bicarbonatado-clorhídrica y la sulfatada es agua con influencia de acumulaciones salinas o estratos salinos en la columna estratigráfica donde se localiza la fuente (regularmente pozo profundo).

Normativa de la calidad del agua para uso y consumo humano

Los principales parámetros y sus límites permisibles considerados en la norma NOM-127-SSA1-1994 en relación con el agua para uso y consumo humano se indican en el cuadro 2. Los sólidos disueltos totales (STD) superan el límite en el pozo Aramburo en dos fechas de muestreo: diciembre y mayo. El resto de los pozos y manantiales, con excepción de Los

Negritos, no presentan problemas para su uso urbano. Las concentraciones de Cl^- , SO_4^{2-} y Na^+ se encuentran dentro del límite que marca la norma para la mayoría de las fuentes de agua, con excepción del pozo Aramburo en relación con la concentración de Na^+ en el muestreo del mes de diciembre.

En este caso, la concentración de Na^+ alcanzó los 280.6 mg l^{-1} (12.2 meq l^{-1}). En relación con el Cl^- , solamente la surgencia de Los Negritos mostró concentraciones elevadas, por ser aguas fuertemente salinas de origen geotérmico.

Sin embargo, después de Los Negritos, el pozo Aramburo mostró la mayor concentración media de Cl^- (1.83 meq l^{-1} , 65.13 mg l^{-1}), lo cual probablemente esté relacionado con un origen común de estas aguas. En el agua potable, el Cl^- le confiere un sabor desagradable (salino), a diferencia de otros iones como el SO_4^{2-} , que en concentraciones superiores a 400 mg l^{-1} puede originar problemas digestivos (laxantes); el Cl^- se mueve libremente hacia las aguas subterráneas y no sufre transformaciones microbianas ni reducción que afecten su concentración.

En relación con los metales pesados, se tomaron los valores de concentración de metales disueltos determinados por ICP-EAA para el análisis de calidad de agua potable, puesto que es el método recomendado para concentraciones menores a 1 mg l^{-1} en soluciones acuosas (Eaton *et al.*, 2005). El problema más severo en cuanto a concentraciones que exceden la norma es para el Pb, el cual alcanzó valores de hasta 10 veces (cuadro 1) la concentración límite (0.01 mg l^{-1} o $10 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$). Considerando la concentración límite permitida, se encontró que 13 pozos/manantiales (81%) superaron este valor, mientras que solamente tres (18%) no rebasaron el valor límite. Por otra parte, la reserva de Pb total en esta agua (media de tres muestreos) es cercana a los $50 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$, concentración apenas un poco mayor a la media de Pb disuelto. No se encontró, sin embargo, una correlación significativa entre la concentración de Pb total y Pb disuelto para el muestreo de diciembre de 2008 ($r = -0.20$).

El Cd total fue detectado en cantidades elevadas en las tres fechas de muestreo. En el primer muestreo de abril del 2008, la concentración media fue de $5.9 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$, aunque

Cuadro 2. Límites permisibles de contaminantes en el agua para uso y consumo humano.

Parámetro	Unidad	Límite permisible
pH		6.5-8.5
Sólidos disueltos totales	mg l^{-1}	1 000.0
Cl^-	mg l^{-1}	250.0
Na^+	mg l^{-1}	200.0
SO_4^{2-}	mg l^{-1}	400.0
Cd	mg l^{-1}	0.005
Fe	mg l^{-1}	0.30
Mn	mg l^{-1}	0.15
Pb	mg l^{-1}	0.01
Cu	mg l^{-1}	2.0
Zn	mg l^{-1}	5.0
As	mg l^{-1}	0.05
B	mg l^{-1}	1.0
Coliformes fecales*	NMP/100 ml	Ausencia o no detectables

*NOM-112-SSA1-1994.

los pozos La Lobera II, La Palma, Aramburo, Real Victoria, Yerbabuena y los manantiales Zapata Pueblo, Zalate, Flor de Agua I y Flor de Agua II presentaron concentraciones de $100 \mu\text{g l}^{-1}$. En el muestreo de diciembre de 2008, las concentraciones detectadas fueron menores (nd a $30 \mu\text{g l}^{-1}$, con media de 5.3); en este caso, solamente resultaron afectados los manantiales Zapata Pueblo, Zapata Molino y el pozo Totolán II. En el muestreo de mayo de 2009, nuevamente se incrementaron las concentraciones ($100 \mu\text{g l}^{-1}$) para los pozos Lobera II, La Palma, Aramburo, Real Victoria y Yerbabuena, y los manantiales Zapata Pueblo, Zalate, Flor de Agua I y Flor de Agua II. Posiblemente la menor concentración de Cd en los pozos y manantiales que se observó en el muestreo de diciembre esté relacionada con procesos de dilución; este elemento se ha correlacionado positivamente en otros trabajos con la concentración salina del agua (Morel y Malcom, 2005). La temporada de lluvias ocurre principalmente en los meses de junio a septiembre (Conagua, 2005) y cabe esperar que las infiltraciones que alimentan los mantos acuíferos se prolonguen más allá de esos meses, reduciendo con ello la concentración de metales totales en estos flujos.

Análisis bacteriológico

Un parámetro empleado para evaluar la calidad del agua para consumo humano es el número de bacterias coliformes, las cuales son indicadoras de la posible contaminación con materia fecal de animales y humanos. La presencia de coliformes también constituye una alerta de posible contaminación con microorganismos patógenos como *Salmonella*, *Vibrio cholerae* y especies de *Shigella*, que son transmitidos por el agua.

De las 51 muestras de agua analizadas, 34 (66%) presentó < 3 coliformes, el resto de los sitios superó el valor crítico con 4 a 460 coliformes fecales/100 ml (cuadro 1).

Esta agua se considera no apta para consumo humano si no recibe un tratamiento ade-

cuado de cloración.

Las fuentes probables de contaminación del agua de pozos y manantiales con bacterias coliformes son: a) agua de escorrentía, que conduce desechos del ganado; b) aplicación de abonos orgánicos en los terrenos agrícolas circundantes, y c) filtraciones de las aguas superficiales contaminadas con desechos domésticos.

Variaciones temporales de los parámetros de calidad del agua

La mayoría de los parámetros analizados mostró una variación estacional en sus valores; para el caso del pH, el mayor valor medio fue en la temporada de estiaje (abril y mayo); la CE mostró un comportamiento similar (figura 2) al igual que los iones mayores, con excepción del Na^+ , CO_3^{2-} y SO_4^{2-} , cuyas concentraciones medias fueron mayores en el mes de diciembre.

La dilución de las soluciones, por tanto, parece ser una de los procesos que controlan la concentración de los iones mayores; así, en la temporada de estiaje ocurre un aumento esperado en la concentración electrolítica, mientras que en temporada de lluvias (en este caso, el muestreo de diciembre) ocurre el proceso contrario.

El Fe y el Mn siguieron un patrón de concentración similar al Na^+ , observándose las mayores concentraciones en la temporada de lluvias. Estos valores fueron correlacionados negativamente con el pH ($r = -0.362$ y -0.318 ; $p = 0.009$ y 0.023 , respectivamente).

El Pb y Cd totales mostraron las mayores concentraciones en la temporada de estiaje (abril y mayo) (figuras 3 y 4). Sin embargo, estos metales no se correlacionaron directamente con la CE o iones mayores, con excepción de la relación Cd-Ca^{2+} ($r = 0.315$, $p = 0.024$). En trabajos previos de diversos autores, se ha reconocido la relación entre la concentración de Cd y la salinidad, detectándose una alta concentración en salinidades moderadamente

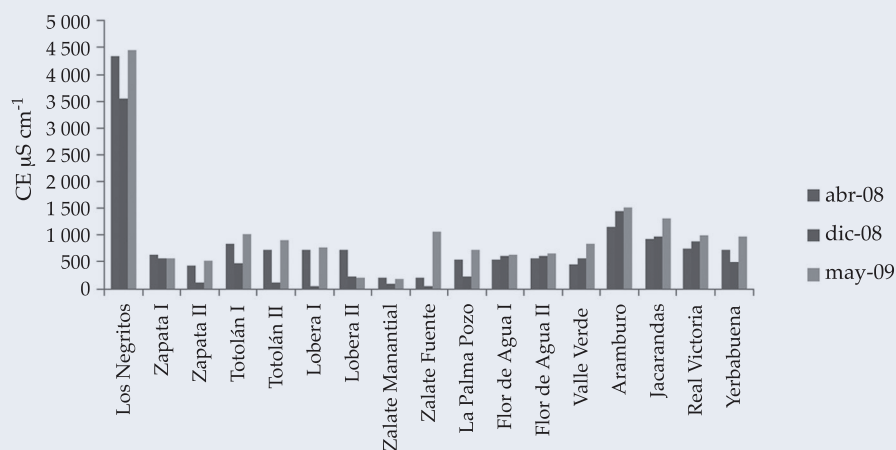


Figura 2. Variaciones de la CE en pozos y manantiales de la Ciénaga de Chapala en tres fechas de muestreo.

altas (Morel y Malcom, 2005).

El comportamiento del B fue similar a la salinidad (CE), con las más altas concentraciones en la temporada de estiaje (figura 5). El B fue altamente correlacionado con la CE ($r = 0.912$, $p < 0.0001$), evidencia de un origen común. El P siguió un patrón similar, observándose las mayores concentraciones en los meses de abril y mayo (temporada de estiaje); sin embargo, no se encontró una relación directa y significativa del P con los otros parámetros analizados.

Debido a la baja velocidad de infiltración del agua meteórica, se puede considerar que en el mes de diciembre todavía se manifiesta la influencia de las precipitaciones en la composición química del agua de los pozos analizados.

Para la zona de estudio objeto de este trabajo, la temporada de lluvias se circunscribe a los meses de junio a octubre (Conagua, 2005). De esta manera, el muestreo realizado en el mes de diciembre representa, para el caso de las aguas subterráneas, las condiciones de la temporada de lluvias; por otro lado, los muestreos de abril de 2008 y mayo de 2009 se asocian con las condiciones de la temporada

de estiaje.

Análisis de componentes principales (ACP)

Los resultados del ACP mostraron la integración de cuatro factores principales que explican el 83.7% de la varianza. Los factores y los parámetros de calidad del agua asociados, así como el coeficiente de correlación respectivo, se muestran en el cuadro 3.

La migración de fluidos magmáticos profundos es evidente por la presencia de boro (Izquierdo *et al.*, 2008); la estrecha relación que se observa entre el B y otros iones mayores como Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , CO_3^{2-} , Cl^{-} y SO_4^{2-} indica un origen común, en este caso los flujos geotérmicos (factor F1, cuadro 3).

El factor F2, que relaciona los metales pesados Fe, Mn, Pb y Cd, puede estar asociado con el intemperismo de los basaltos. Es notorio, por otro lado, la relación que se observa entre el Mg^{2+} y el HCO_3^{-} , agrupados en el factor F3. Es posible, como hipótesis, que estos iones sean derivados del intemperismo de minerales carbonatados de Mg como la dolomita. Finalmente, el factor F4 incluye solamente a las coliformes fecales (CF) por lo que éste puede asociarse estrechamente con

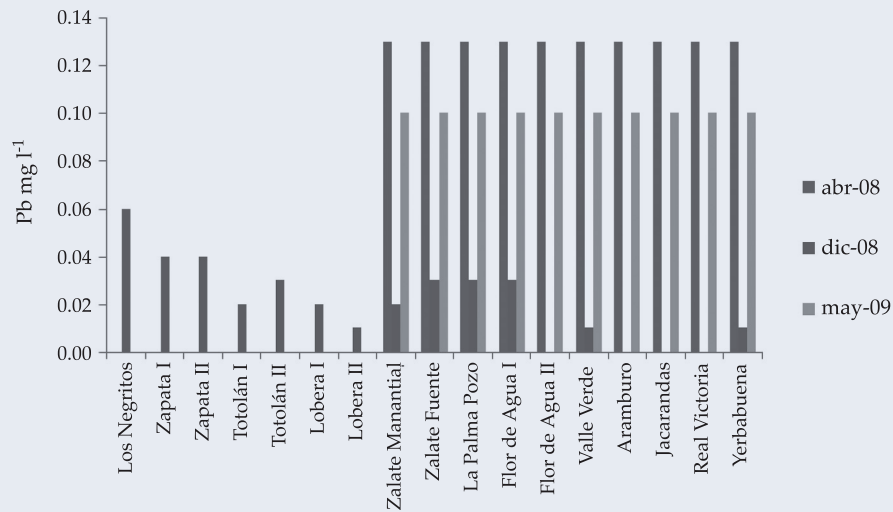


Figura 3. Variaciones en la concentración de Pb total (EAA) en pozos y manantiales de la Ciénaga de Chapala en tres fechas de muestreo.

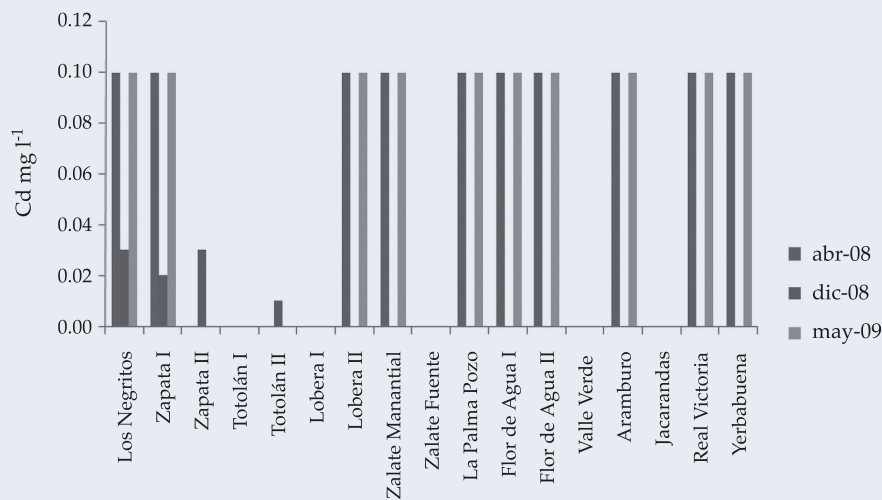


Figura 4. Variaciones en la concentración de Cd total en pozos y manantiales de la Ciénaga de Chapala en tres fechas de muestreo.

los flujos superficiales contaminados que, al parecer, pueden estar invadiendo las fuentes de agua subterránea y manantiales.

Análisis Cluster Jerárquico Ascendente (ACJA)

El análisis multivariado tipo ACJA mostró cuatro agrupamientos (clusters) de los pozos y

manantiales analizados (figura 6).

Cluster 1: pozo Valle Verde, Zalate Fuente, manantial Zalate, pozo Yerbabuena, pozo Real Victoria, Pozo La Palma, manantial Flor de Agua II, manantial Zapata Pueblo, manantial Flor de Agua I.

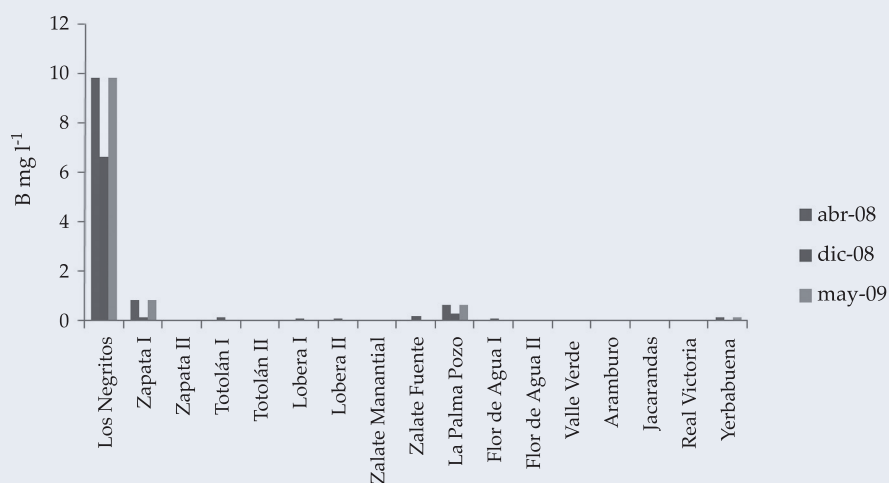


Figura 5. Variaciones en la concentración de B en pozos y manantiales de la Ciénaga de Chapala en tres fechas de muestreo.

Cuadro 3. Correlaciones entre los parámetros de calidad del agua y los factores obtenidos del ACP. Aguas subterráneas.

Parámetro de calidad del agua	F1	F2	F3	F4
pH	0.269	-0.490	0.230	-0.556
CE	0.994	0.012	0.063	-0.053
Ca ²⁺	0.907	0.048	-0.003	0.339
Mg ²⁺	0.246	0.349	0.798	0.336
Na ⁺	0.982	-0.040	-0.047	-0.136
K ⁺	0.968	-0.039	0.048	-0.184
CO ₃ ²⁻	0.961	-0.142	-0.169	-0.086
HCO ₃ ⁻	0.467	0.291	0.762	0.112
Cl ⁻	0.970	-0.128	-0.141	-0.072
SO ₄ ²⁻	0.857	0.248	0.194	0.045
Fe	0.144	0.404	-0.312	-0.377
Mn	0.117	0.821	0.133	-0.462
Pb	-0.174	0.849	-0.121	-0.214
Cd	0.322	0.448	-0.429	0.240
B	0.951	-0.161	-0.216	-0.091
P	0.133	-0.721	0.179	-0.022
CF	0.482	0.163	-0.443	0.559

Cluster 2: pozos Aramburo y Jacarandas.

Cluster 3: pozos Totolán I, La Lobera I, Lobera II y Totolán II; manantial Zapata molino.

Cluster 4: manantial Los Negritos.

El cluster 4, conformado por la surgencia de Los

Negritos, se caracteriza por su elevada salinidad; mientras que el resto de los agrupamientos presenta salinidades decrecientes. En general, la salinidad siguió el orden siguiente: cluster 4 > cluster 2 > cluster 3 ≈ cluster 1. Con base en estos datos, podemos considerar que en la zona se localizan dos acuíferos con marcada diferencia

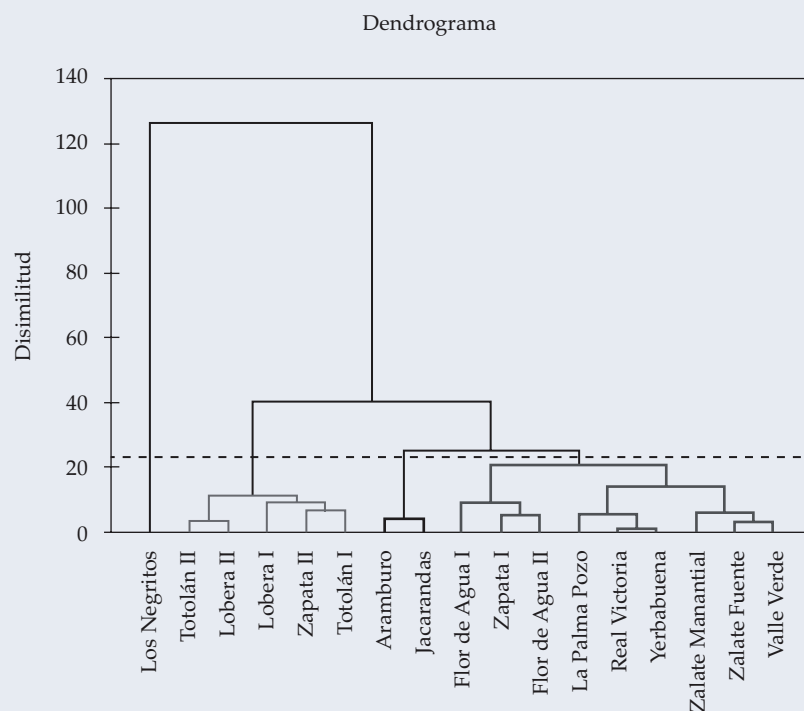


Figura 6. Agrupamientos de los pozos derivados del Análisis Cluster Jerárquico Ascendente (CJA).

en la concentración de sales solubles: acuífero 1, con influencia geotérmica generadora de salmueras, representado por la surgencia de Los Negritos, y acuífero 2, de aguas volcánicas de baja concentración con recarga reciente de agua meteórica, representado por los cluster 1 y 3. El cluster 2 muestra una mezcla de los flujos de estos dos acuíferos.

Índice de calidad del agua

Los valores del índice de calidad de agua (ICA) calculado para cada uno de los sitios analizados y en tres fechas de muestreo se aprecian en la figura 7.

De la totalidad de los sitios analizados en las tres fechas de muestreo resultaron 51 valores de ICA; de éstos, el 4% correspondió a agua de baja calidad ($ICA \geq 66$); 47% (24 muestras), a agua de moderada calidad ($ICA = 33-65$), y 49% (25 muestras) a agua de buena calidad ($ICA < 33$).

Los mayores valores medios de ICA, y

por tanto menor calidad del agua, fueron para la surgencia Los Negritos, seguido de los manantiales Flor de Agua I y II, pozos Aramburo, La Palma, manantiales Zalate y Zapata Pueblo; por último, los menores ICA y mejor calidad de agua correspondieron a los pozos Valle Verde, Jacarandas, Totolán I, Totolán II, La Lobera I y La Lobera II.

Modelo lineal para un índice de calidad de agua

Los parámetros de calidad del agua se correlacionaron con los valores de ICA, seleccionándose aquellos con mayor valor de r (CE, Pb y Cd) para generar un modelo lineal predictivo; aunque el B se correlacionó significativamente, éste no se incluyó en el modelo final para simplificar el número de parámetros. Por otro lado, el B se correlacionó positivamente con la CE, por lo que este último parámetro integra el efecto del B (cuadro 4).

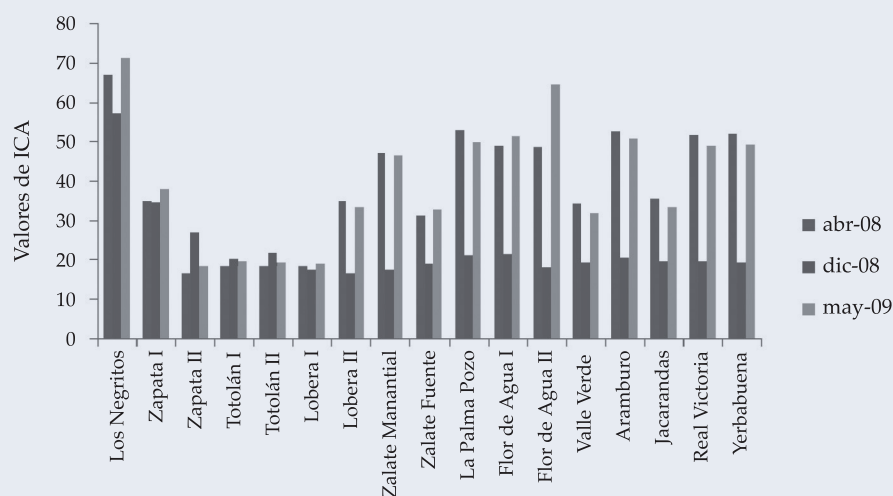


Figura 7. Valores del ICA para los manantiales y pozos analizados de la Ciénaga de Chapala.

El modelo resultante fue:

$$\text{ICA} = 13.6 + 0.008 \cdot \text{CE} + 116.8 \cdot \text{Pb} + 185.3 \cdot \text{Cd}$$

$$r^2 = 0.960$$

En la figura 8 se observa la relación entre los valores del ICA calculados y los estimados con este modelo; la significancia de los parámetros en el modelo fue alta (cuadro 5).

Conclusiones

Los parámetros de calidad del agua mostraron una amplia variación, indicando la existencia de distintos acuíferos y diversos factores que determinan su composición química. Las principales familias de agua fueron la mixta-bicarbonatada, con influencias menores de la sódico-bicarbonatada y sódico-clorhídrica. Los principales factores asociados con la calidad del agua fueron los flujos geotérmicos, el intemperismo de los minerales silicatados de los basaltos, la posible presencia de minerales carbonatados de Mg y la infiltración de flujos superficiales contaminados.

Los problemas potenciales sanitarios, derivados del uso de estos flujos para consumo

humano, se relacionan con toxicidad de B y metales pesados como el Cd y Pb; debido a la presencia de coliformes fecales en algunas de las fuentes bajo estudio, es necesaria la cloración de estos flujos antes de ser usados como agua potable. Se detectaron cuatro agrupamientos de los pozos y manantiales que básicamente pueden asociarse a dos acuíferos, uno de ellos de alta concentración electrolítica y el otro de baja concentración. En relación con el ICA, el 96% de las fuentes de agua estudiadas mostró buena y moderada calidad, siendo el 4% restante, agua de baja calidad.

El Cd mostró una alta correlación con el índice de calidad del agua. Los parámetros que determinan en mayor medida el ICA fueron, en orden del valor del coeficiente de correlación, el Cd, Pb y CE. Los niveles de metales pesados (Pb, Cd) detectados en las fuentes de agua usadas para consumo humano indican la necesidad de realizar monitores sistemáticos para confirmar y, en su caso, determinar la dinámica de estos elementos; con ello podrán plantearse medidas de manejo de estas fuentes que reduzcan las posibilidades de daños a la salud en las poblaciones que hacen uso de

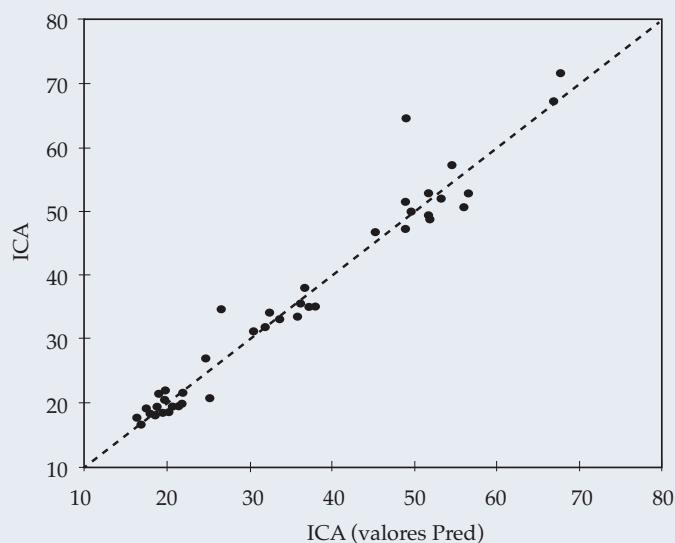


Figura 8. Relación entre los valores del ICA calculados y los estimados por el modelo lineal.

Cuadro 4. Correlaciones entre variables e índice de calidad de agua (ICA). Aguas subterráneas.

	pH	CE	Pb	Cd	B	P	CF
<i>r</i>	0.229	0.540	0.596	0.841	0.522	-0.183	0.377
<i>p</i>	0.106	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.199	0.006

Cuadro 5. Significancia de los parámetros del modelo de regresión múltiple para el ICA.

Fuente de variación	Valor	<i>t</i>	<i>Pr</i> > <i>t</i>
Intersección	13.632	16.972	< 0.0001
CE	0.008	14.848	< 0.0001
Pb	116.771	11.865	< 0.0001
Cd	185.299	16.672	< 0.0001

tales flujos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento del Instituto Politécnico Nacional para la realización de este trabajo.

Recibido: 15/12/10

Aprobado: 05/12/11

Referencias

- ADDINSOFT, INC. XLSTAT. *Herramienta Estadística*. Consultado 10/05/2009. <http://xlstat-win.addinssoft.qarchive.org/>
- AYERS, R.S. y WESTCOT, D.W. *La calidad del agua y su uso en la agricultura*. Estudio FAO Riego y Drenaje 29. Rev. 1.

- Traducido al español por J.F. Alfaro (Water Quality and Use in Agriculture), Rome, Italy, 1989, 174 pp.
- AGUILLÓN, J.E., ALATORRE, C., CRUICKSHANK, C., GAMIÑO, B., MARTÍNEZ, J.L., MENDOZA, R., MONJE, I., SOLÍS, R. y TRIPA, M. Diagnóstico energético e hidráulico del estado de Michoacán. Morelia, México: IE-UNAM, CIDEM, 2005, 212 pp.
- CARREÓN-FREYRE, D., CERCA, M., LUNA-GONZÁLEZ, L. y GÓMEZ-GONZÁLEZ, F.J. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencia Geológicas*. Vol. 22, 2005, núm. 1, pp. 1-18.
- CONAGUA. Plan director para la modernización integral del Distrito de Riego 024 Ciénaga de Chapala, Michoacán. Sahuayo, México: Comisión Nacional del Agua, 2005, 211 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México, edición 2010*. Comisión Nacional del Agua [en línea] citado el 10 de octubre del 2010. Disponible en la World Wide Web: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-10EAM2010.pdf>.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. *Hidrología Subterránea*. Segunda edición. Barcelona: Ediciones Omega, 1983, pp. 1897-1905.
- EATON, A.D., CLESCERI, L.S. RICE, E.W. and GREESBERG, A.E. (editors). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21st edition. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2005, 1207 pp.
- IZQUIERDO, G., ARELLANO, V.M. y ARAGÓN, A. Características mineralógicas y microtermométricas del yacimiento geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Geotermia*. Vol. 21, núm. 2, 2008, pp. 2-10.
- MOREL, F.M.M. and MALCOM, E.G. The biogeochemistry of cadmium. In Sigel, A., Sigel, H., and Sigel, R.K.O. (editors). *Metal ions in biological systems*. Vol. 43. Boca Raton, USA: Taylos & Francis Group, 2005, pp. 195-219.
- 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 [en línea]. Secretaría de Salud [citado el 10 de octubre del 2009]. Disponible en la World Wide Web: <http://bibliotecas.salud.gob.mx/cgi-bin/library>.
- Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Bienes y Servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica de número más probable [en línea]. Consultado 09/02/2012. <http://bibliotecas.salud.gob.mx/gsd/collect/nomssa/index/assoc/HASH8ceb.dir/doc.pdf>
- SOTELO, E. Recomendaciones técnicas del INE por subcuenca. En *Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. Cotler-Ávalos, H., Mazari-Hiriart, M. y de Anda-Sánchez, J. (editores). SEMARNAT-INE-UNAM, México, D.F., 2005, pp. 163-187.
- STUMM, W. and MORGAN, J. *Aquatic chemistry*. 3rd. ed. A Wiley-Interscience Publication. New York, NY, USA, 1996, pp. 672-725.
- TSEGAYE, T., SHEPPARD, D., ISLAM, K.R., JONSON, A., TADESSE, W., ATALAY, A., and MARZEN, L. Development of chemical index as a measure of in-streamwater quality in response to land-use and land cover changes. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 174, 2006, pp. 161-179.
- VIGGIANO-GUERRA, J.C. y GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L.C. Estudio petrográfico y modelo conceptual preliminar de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica de México*. Vol. XXII, núm. 4, 2007, pp. 61-73.

Abstract

VELÁZQUEZ-MACHUCA, M.A. & PIMENTEL-EQUIHUA, J.L. *Drinking water quality in Ciénaga de Chapala, Michoacán, Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, Special Number TyCA-RETAC, February-March, 2012, pp. 111-125.*

In order to assess pollution levels in sources of water for human consumption and use, 17 sites were selected (springs and wells) in the municipalities of Villamar, Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza and Cojumatlán for sampling on 3 dates between April and December 2008 and May 2009. The water quality parameters analyzed were: pH, temperature, EC, Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, total (Fe, Mn, Pb, Cd) and dissolved metals (Fe, Mn, Pb, Cd, As, Zn), B, total P and fecal coliform. Data were processed using multivariate statistical analysis and by calculating the Water Quality Index (WQI) for each site and sampling date. Results showed that the parameters that exceeded the permissible limits for human consumption and use were B, Cd, Pb and fecal coliform. The main factors associated with water quality were geothermal flows, weathering silicate and carbonate minerals and infiltration of contaminated surface water. Four groups of wells and springs were determined to be associated with two types of aquifers. With regard to the WQI, 96% of evaluated water sources were observed to have good and moderate quality, and the remaining 4% were of poor quality. The levels of heavy metals (Pb, Cd) detected in water sources for human consumption indicate the need to systematically monitor these elements in order to reduce the potential danger to health among populations using it.

Keywords: *water pollution, water quality index, multivariate statistical analysis, heavy metals.*

Dirección institucional de los autores

Dra. Martha A. Velázquez Machuca

Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) del Instituto
Politécnico Nacional (IPN)-Michoacán
Justo Sierra 28
59510 Jiquilpan, Michoacán, México
Teléfono: +52 (353) 5330 218
mvelazquezm@ipn.mx

Dr. José Luis Pimentel Equihua

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Km 35.5 Carretera Federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, México
Teléfono: + 52 (55) 5121 504
jequihua@colpos.mx