

HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES DE LA CIÉNEGA DE CHAPALA E ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA

Hydrochemistry of Surface Water in the Ciénega of Chapala and Water Quality Index

Chávez-Alcántar, A.¹, Velázquez-Machuca, M.^{1‡}, Pimentel-Equihua², J. L., Venegas-González, J.¹, Montañez-Soto, J. L.¹ y Vázquez-Gálvez, G.¹

RESUMEN

El gran deterioro de la calidad del agua causada por la contaminación constituye un importante factor en la pérdida de fuentes de agua en Michoacán. La Ciénega de Chapala es una zona especialmente vulnerable a los procesos de contaminación hídrica, lo que hace necesario evaluar la calidad del agua para proponer soluciones al problema. El objetivo del trabajo fue evaluar la composición química del agua superficial, el origen de los contaminantes y el grado de contaminación de las corrientes y cuerpos de agua en la zona. Para analizar la composición química y bacteriológica del agua, se seleccionaron 16 sitios y se muestreó en tres fechas en ríos, presas, canales y Lago de Chapala. Se usó análisis estadístico multivariado y se calculó un índice de calidad de agua (ICA) para cada sitio y fecha de muestreo. Los resultados mostraron que la concentración de los contaminantes en las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala se incrementó aguas abajo. El mayor aumento fue para la conductividad eléctrica (CE), coliformes fecales (CF) y P total. El cambio en las relaciones iónicas Na/Ca y Cl/SO₄ aguas abajo indicó una tendencia hacia la composición Na-SO₄ de estas aguas. De acuerdo con los valores del ICA calculados, el 44 y 53% de los sitios bajo estudio presentaron buena y moderada calidad de agua, respectivamente. La mejor calidad de agua fue en la zona de ríos y presas con poca influencia de actividades antropogénicas, mientras que la más baja calidad correspondió al Lago de Chapala. Las variables químicas y bacteriológicas que se asociaron significativamente con el ICA fueron la CE, Pb, Cd, B, P y CF; la CE fue la que principalmente se

correlacionó con el deterioro de la calidad del agua. En orden de importancia, los drenajes agrícolas y las aguas residuales son las principales fuentes de contaminantes en la zona.

Palabras clave: río Tarecuato, río Jiquilpan, contaminación del agua, aguas residuales, análisis multivariado.

SUMMARY

The serious deterioration of water quality caused by pollution is an important factor in the loss of water sources in Michoacán. The “Ciénega de Chapala” is an especially vulnerable zone in terms of processes of water pollution. The objective of this study was to evaluate the chemical composition of surface water, the causes of pollution, and the degree of contamination that exist in rivers and water bodies of the area. In order to analyze the chemical and bacteriological composition of water, sixteen sampling sites at three different dates were established for testing on rivers, dams, channels network and Lake Chapala. Multivariate statistical analysis was used, and a water quality index (WQI) was calculated for each site and sampling date. The results revealed that the concentration of contaminants of the surface water increased downstream as the sampling sites of rivers, water bodies and channels network neared Lake Chapala; the highest values found were for electrical conductivity (EC), fecal coliforms (FC), and total P. The change in Na/Ca and Cl/SO₄ ionic relationships indicates an increasing trend in Na-SO₄ composition. According to the WQI calculated values of sites studied, 44 and 53% presented good or moderately good water quality, respectively. The best water quality was in the rivers and dams where the influence of anthropogenic activities is less, while the lowest quality was found in water of Lake Chapala. The chemical and bacteriological parameters that were significantly associated with the WQI were EC, Pb, Cd, B, P and FC; EC was identified as the principal parameter correlated with

¹ CIIDIR-IPN-Michoacán. Justo Sierra 28, Col. Centro. 59510 Jiquilpan, Michoacán.

[‡] Autor responsable (mvelazquezm@ipn.mx)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

the deterioration of water quality. In order of importance, agricultural drainage and residual waters are the main sources of pollution in the zone.

Index words: Tarecuato river, Jiquilpan river, water pollution, wastewater, multivariate analysis.

INTRODUCCIÓN

La canalización de los drenajes agrícolas, aguas residuales domésticas e industriales hacia los cuerpos de agua ha generado un fuerte deterioro en la calidad química y microbiológica del agua. En Michoacán se estima que cerca del 70% de las fuentes de agua se han perdido como consecuencia de azolve, sobreexplotación y contaminación (Aguillón *et al.*, 2005). El área de la Ciénega de Chapala correspondiente al estado de Michoacán (CCM) es especialmente sensible a los problemas de contaminación como consecuencia de la problemática hídrica que tiene actualmente: sobreexplotación de acuíferos, escasez de agua de riego de buena calidad, inundaciones periódicas y suelos agrícolas con acumulación de sales solubles y sodio intercambiable (Silva-García *et al.*, 2002). Estas condiciones pueden acentuarse con los vertidos de drenajes domésticos y agrícolas a la red hidrográfica, los cuales constituyen un aporte importante de contaminantes físico-químicos y microbiológicos (Cohn *et al.*, 1999; Baird, 2001), aunque a la fecha no se cuenta en la zona con estudios sobre cuantificación de contaminantes en las aguas superficiales. El origen de los contaminantes en un cuerpo de agua puede analizarse con metodologías como los trazadores biogeoquímicos (Lindeman, 2004) y técnicas estadísticas ambientales del tipo de análisis multivariado (Boyacioglu y Boyacioglu, 2007); esta última herramienta facilita el análisis de los datos ambientales puesto que permite clasificar y modelar la información, revelar tendencias en el tiempo e identificar la contribución de la contaminación en los valores analíticos obtenidos. Por otro lado, el índice de calidad de agua (ICA) es un instrumento usado frecuentemente en la evaluación de los cuerpos de agua; éste índice simplifica la expresión de un conjunto complejo y multidimensional de parámetros físico-químicos y biológicos (Bordalo *et al.*, 2001; Stambuk-Giljanovic, 2003) y permite comparar valores entre diferentes cuerpos de agua con base en una calificación única. Los valores absolutos del índice de calidad de agua

representan porcentajes de agua limpia o de agua contaminada, dependiendo del método utilizado en los cálculos matemáticos. El objetivo de este trabajo fue determinar las propiedades químicas de las aguas superficiales en la CCM, analizar el origen de los contaminantes y el grado de contaminación y detectar los puntos y cuerpos de agua donde requieran tomarse medidas urgentes para el control de la contaminación, utilizando para ello el análisis estadístico multivariado y el diseño de un índice de calidad de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de Estudio

Comprendió la porción Michoacán de la sub-cuenca 3 Chapala o Ciénega de Chapala (CCM), conforme a la delimitación establecida para la cuenca Lerma-Chapala (Sotelo-Núñez, 2006), en los municipios de Villamar, Jiquilpan, Sahuayo, Venustiano Carranza y Cojumatlán. La zona abarca unas 20 000 ha de la antigua planicie de desecación del Lago de Chapala, siendo las principales corrientes y cuerpos de agua el río Tarecuato, río Jiquilpan, río Sahuayo y el Lago de Chapala. El valle es surcado por una red intrincada de canales y drenes que vierten sus excedentes hacia el Lago en temporada de lluvias; en el estiaje, los caudales del Lago de Chapala son utilizados en el riego agrícola. El río Tarecuato, conectado a la CCM a través de canales, túneles, presas de derivación y presas de almacenamiento, es de régimen permanente y fluye desde el manantial del mismo nombre hasta el río Jiquilpan, en el sureste de la CCM. Los ríos Jiquilpan y Sahuayo se originan de barrancas en las serranías del oeste de la CCM, su régimen es principalmente intermitente y en temporada lluviosa pueden conducir fuertes avenidas que causan las periódicas inundaciones en la Ciénega; en temporada de estiaje estos ríos conducen pequeños flujos provenientes de las represas de Abadiano y Las Fuentes, situadas en la cabecera de ambos ríos. La CCM es un valle aluvial con origen en el Cuaternario y se encuentra rodeado de rocas ígneas extrusivas del Terciario (Uribe-Luna, 2006). Los suelos que predominan en el valle se formaron a partir de depósitos de origen vulcano-clástico y material aluvial; son suelos de textura fina con drenaje y aireación pobre (Garrido-Pérez *et al.*, 2006) y forman grietas profundas cuando el suelo está seco. Estas son características de los suelos denominados Vertisoles,

de acuerdo con el sistema Norteamericano de clasificación de suelos (Brady y Weil, 2002). La planicie se encuentra alternada con lomeríos y montañas basálticas y tobas básicas donde predominan los suelos Feozem con textura media a fina, drenaje moderado, contenidos medios a altos de materia orgánica y buena aireación.

Sitios de Muestreo

Se seleccionaron 16 sitios de muestreo (Figura 1): 1) manantial Tarecuato, 2) presa Guaracha, 3) presa Jaripo, 4) presa Abadiano, 5) presa Las Fuentes, 6) corriente Santa Bárbara, 7) río Jiquilpan, 8) La Palma-Lago, 9) Cojumatlán-Lago, 10) río Sahuayo, 11) canal Pajacuarán, 12) canal La Palma, 13) canal Jiquilpan,

14) canal Cotijarán, 15) canal Cuatro puntos y 16) canal Sahuayo. El manantial Tarecuato surge en las inmediaciones del poblado Tarecuato; sus aguas se derivan para uso y consumo humano en diversos poblados circunvecinos y sus excedentes son canalizados a las presas Jaripo y Guaracha para riego en la Ciénega de Chapala, módulo I La Palma. Tanto el manantial como las presas son eventualmente contaminados por las descargas domésticas de las pequeñas poblaciones adyacentes, desalojados generalmente a través de barrancas que derivan a estos cuerpos de agua. Las Fuentes es una pequeña represa situada en las afueras del poblado de Abadiano y recibe la mayor parte de las aguas residuales ahí generadas; sus caudales son utilizados para abrevadero de ganado y para riego agrícola. En la presa Abadiano nace el río Sahuayo

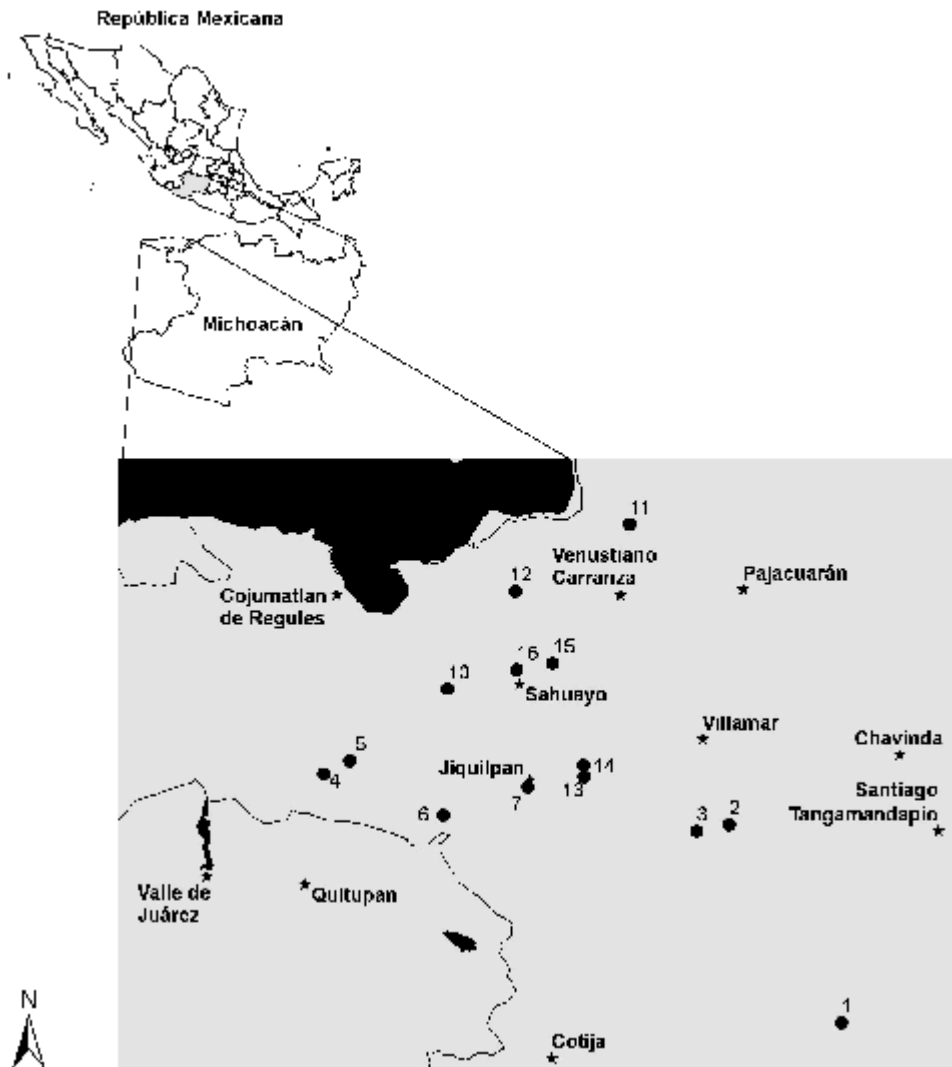


Figura 1. Zona de estudio y sitios de muestreo.

y recibe también descargas domésticas. Santa Bárbara corresponde a la corriente adyacente al poblado del mismo nombre, al oeste de Jiquilpan. El sitio río Jiquilpan se ubica sobre el punto conocido localmente como Tres Ríos, donde se incorporan aguas de las barrancas río Colorado y Los Laureles. El sitio Río Sahuayo se localiza sobre la barranca Flor del Agua, en las afueras de la ciudad de Sahuayo. La Palma-Lago y Cojumatlán-Lago corresponden al Lago de Chapala en las márgenes de los poblados del mismo nombre. Los canales conducen los drenajes parcelarios del área agrícola cercana a Sahuayo, Jiquilpan, Emiliano Zapata y Villamar, así como las aguas residuales de estas poblaciones.

Muestreo y Análisis Químico y Bacteriológico

Se tomaron muestras de agua de los sitios seleccionados, en tres fechas de muestreo (2 de abril del 2008, 4 de diciembre de 2008 y 24 de mayo de 2009), las cuales se colocaron en recipientes de polipropileno de 1 litro previamente lavados con agua acidificada, y se trasladaron al laboratorio del CIIDIR-IPN-Michoacán (Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Michoacán) para su análisis y donde fueron almacenadas a 4 °C. Los análisis químicos y bacteriológicos y su metodología fueron: pH, con un potenciómetro marca Orion; conductividad eléctrica (CE), con un conductímetro marca Orion; Cl, por precipitación con AgNO_3 ; CO_3 y HCO_3 , por titulación con H_2SO_4 ; SO_4 , por precipitación con cloruro de bario; Ca y Mg, por absorción atómica; Na y K, por emisión de flama; Fe, Mn, Pb y Cd por absorción atómica; B, método de la curcumina (Eaton *et al.*, 2005); P total extraído con persulfato y determinado por el método del ácido ascórbico (Eaton *et al.*, 2005); coliformes fecales (CF) por el método del número más probable (NORMA Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994).

Análisis Estadístico

Se realizó una descripción estadística de los valores obtenidos (rango, media, desviación estándar). Se utilizó análisis multivariado del tipo análisis de componentes principales (ACP) y análisis de clusters jerárquico ascendente (ACJA) para agrupar las variables de calidad de agua y los sitios de muestreo, respectivamente. Los datos fueron procesados en el programa XLSTAT (Addinsoft, 2009).

Índice de Calidad del Agua (ICA)

La selección de las variables para integrar un ICA depende de los objetivos del estudio, del tipo e importancia de los contaminantes e incluso de los recursos técnicos y financieros. En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) inició los trabajos sobre indicadores de calidad del agua en los años 70's utilizando entonces 18 variables; a partir de 2003 solamente utiliza dos: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y demanda química de oxígeno (DQO) (Mejía-Maravilla *et al.*, 2006). Se ha cuestionado el hecho de que ciertos contaminantes presentes en los cuerpos de agua no están contemplados en el ICA que maneja la CONAGUA, pero que representan un riesgo potencial para la biota que habita en ellos (Sedeño-Díaz y López-López, 2006). Se calculó un ICA para cada uno de los sitios y fechas de muestreo, con el objetivo de dar un valor numérico al grado de contaminación de cada sitio bajo estudio y establecer comparativos de calidad de agua entre ellos. El ICA fue determinado mediante el método de normalización y suma de los valores de los parámetros de calidad de agua, medidos en cada sitio y fecha de muestreo. Entre las diversas metodologías para establecer ICA (Dinius, 1987; Said *et al.*, 2004; Sarkar y Abbasi, 2006) se seleccionó la de Tzegaye *et al.* (2006); en ésta, los datos de las variables de calidad del agua (ACP_x) son normalizados (ACP_i) en relación al valor máximo (ACP_{max}) de cada variable, $\text{ACP}_i = (\text{ACP}_x / \text{ACP}_{max}^{-1})$. Sumando todos los ACP_i 's y dividiendo entre su número total se calculó el ICA:

$$ICA = \sum_{x=1}^n [(\text{ACP}_x)(\text{ACP}_{max}^{-1})] \times n^{-1} \quad (1)$$

El ICA puede variar de 0 a 100, considerando los valores cercanos a cero como índices de mejor calidad del agua y los valores cercanos a 100 como los de menor calidad. Para efectos de delimitar clases de calidad de agua, se establecieron los rangos de $ICA = 0 - 33$ como buena calidad; $ICA = 34 - 66$, moderada calidad, $ICA > 66$ fue agua de baja calidad. La pertinencia de las variables seleccionadas para ser utilizadas como indicadores individuales de la degradación de la calidad del agua, se evaluó mediante correlación estadística entre el ICA y cada parámetro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables de calidad de agua analizadas presentaron un amplio rango de valores, con excepción de los metales pesados (Fe, Mn, Pb y Cd) cuya distribución relativamente uniforme se confirma por el bajo valor del coeficiente de variación (Cuadro 1). El pH fue de moderadamente ácido a alcalino y la salinidad (estimada a través de la CE) fue baja en el 64% y moderada en el 16% de las muestras, respectivamente, de acuerdo con la clasificación de Ayers y Westcot (1989). Los metales pesados (Fe, Mn, Pb y Cd) se detectaron en bajas concentraciones que no exceden los límites permisibles para contaminantes en descargas de aguas y bienes nacionales (Norma Oficial Mexicana: NOM-001-ECOL-1996); sin embargo, el vertido de los drenajes domésticos y agrícolas de la Ciénega hacia el Lago de Chapala puede constituir una fuente de enriquecimiento de metales pesados en este reservorio. La acumulación de metales pesados en el Lago con el tiempo ha sido observada por Hansen y van Afferden (2001), quienes han detectado contenidos elevados que son un problema para la salud de la población de Guadalajara, la cual utiliza esta agua para consumo doméstico.

El B se encontró en concentración mayor a 1 mg L⁻¹ en 4% de las muestras de agua. En relación con el P, 26% de las muestras excedieron el límite marcado (< 0.05 mg L⁻¹) para influentes a lagos y embalses (Flores-Martínez *et al.*, 2006). La mayor variación fue para coliformes fecales (Cuadro 1), condición que se explica por la diversidad de sitios de muestreo donde se incluyeron desde manantiales (nacimiento del río Tarecuato) hasta canales que conducen drenajes domésticos y agrícolas.

Para esta variable, 61% de las muestras de agua presentaron buena calidad para riego, con menos de 1000 coliformes NMP 100 mL⁻¹ (Flores-Martínez *et al.*, 2006).

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El ACP se utilizó para agrupar los datos de calidad del agua siguiendo la metodología de Boyacioglu y Boyacioglu (2007), la cual comprendió una matriz de correlación, la extracción de factores por el coeficiente de Pearson y la utilización de la rotación varimax. Se obtuvieron cuatro factores que explicaron el 87.8% de la varianza en el modelo (Cuadro 2). Las variables

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables químicas y bacteriológicas del agua en la ciénega de Chapala, Michoacán, México.

Variable	Unidad	Mínimo	Máximo	Media	LMP		Desviación estándar
					Agrícola	Vida acuática	
pH		6.4	8.3	7.46	6.5-9.0		0.41
CE	μS cm ⁻¹	27.4	1570	598.3	1000		458.3
Ca	meq L ⁻¹	0.18	5.44	2.07			1.78
Mg	meq L ⁻¹	0.1	5.76	1.53			1.39
Na	meq L ⁻¹	0.05	10.43	1.83			2.17
K	meq L ⁻¹	0.02	2.89	0.7			0.83
CO ₃	meq L ⁻¹	0	3.49	0.14			0.59
HCO ₃	meq L ⁻¹	0.32	11.92	3.61			2.6
Cl	meq L ⁻¹	0	2.86	0.94			0.82
SO ₄	meq L ⁻¹	0	5.27	1.31	2.5		1.33
Fe	mg L ⁻¹	0	0.27	0.06	5	1	0.08
Mn	mg L ⁻¹	0	0.67	0.1			0.17
Pb	mg L ⁻¹	0	0.13	0.06	5		0.06
Cd	mg L ⁻¹	0	0.1	0.05	0.01		0.05
B	mg L ⁻¹	0	1.51	0.25	0.7		0.38
P	mg L ⁻¹	0	2.31	0.27		0.1	0.52
CF	NMP 100 mL ⁻¹	9	920 000	36 541	1000		148 703.3

LMP = límite máximo permitido por la norma CE-CCA-001/89 (SEDUE, 1989). CF = coliformes fecales. NMP = número más probable.

de salinidad (CE, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, SO₄) y el B se asociaron al primer factor (F1), que tiene probablemente origen en los drenajes agrícolas.

Como trazadores biogeoquímicos, el Ca y el Mg se han relacionado con la contaminación agrícola difusa (Lindeman, 2004), mientras que el Na y SO₄ con las aguas residuales. Sin embargo, en este caso el Na y SO₄ fueron asociados con el Ca y Mg, lo que indica que aquellos pueden también derivarse de los drenajes agrícolas. Esta situación puede explicarse por las particularidades que se observan en los suelos de la CCM. Los suelos agrícolas de esta planicie poseen elevadas concentraciones de sales solubles y sodio intercambiable (Silva-García *et al.*, 2002), las cuales pueden ser fácilmente liberadas a los drenajes agrícolas por procesos de disolución, intercambio iónico y arrastre que ocurren en los horizontes superficiales y sub-superficiales del suelo con la aplicación del agua de riego o lluvia (Velázquez-Machuca *et al.*, 2002).

El segundo factor (F2) agrupó las variables relacionadas con las aguas residuales (P, CF, Mn). La asociación del Mn con este grupo puede derivarse de la generación de procesos de reducción (bajo potencial redox) en las corrientes contaminadas con aguas residuales; estos procesos solubilizan metales como el Mn (Stumm y Morgan, 1996). Las aguas residuales son también fuente de metales pesados (Baird, 2001).

Cuadro 2. Correlación entre las variables y los factores en el análisis de componentes principales.

	F1 [†]	F2	F3	F4
pH	-0.215	-0.32	-0.784	-0.171
CE	0.948 [‡]	0.271	0.141	-0.034
Ca	0.916	0.217	-0.083	-0.116
Mg	0.66	0.664	0.212	0.137
Na	0.944	0.036	-0.013	-0.138
K	0.833	0.243	0.429	-0.024
HCO ₃	0.844	0.505	0.052	-0.051
Cl	0.914	0.292	0.195	-0.034
SO ₄	0.958	-0.081	0.039	-0.096
Fe	-0.288	0.144	0.074	0.881
Mn	0.281	0.84	0.374	0.107
Pb	0.242	0.091	0.897	-0.061
Cd	-0.269	0.225	0.768	0.093
B	0.557	-0.529	0.043	0.382
P	0.426	0.732	0.3	0.054
CF	0.151	0.847	0.063	0.055

[†] Factores del análisis de componentes principales. [‡] Coeficiente de correlación entre las variables y los factores.

El factor F3 se relacionó con los metales Pb y Cd y su origen se atribuyó a la geología de la zona. La relación del pH con alto coeficiente negativo puede explicarse en términos del efecto del pH sobre la concentración de los metales (Cuadro 2), donde un aumento en el pH causa un incremento en la afinidad de los ligandos orgánicos e inorgánicos con estos elementos y reduce la concentración de sus formas químicas libres (Moreno-Sánchez *et al.*, 1999).

El último factor (F4) incluyó solamente al Fe. Este se origina de los sedimentos erosionados de la parte alta y que son arrastrados hacia los cuerpos de agua a través de procesos de escorrentía. El porcentaje de la variabilidad total atribuida a cada uno de los cuatro factores fue de: F1 = 44%, F2 = 21%, F3 = 16% y F4 = 6.5%. Estos datos sugieren que la calidad del agua superficial en la CCM es controlada principalmente por drenajes agrícolas y descargas domésticas, tal como se ha encontrado que ocurre en otras corrientes de agua (Boyacioglu y Boyacioglu, 2007).

Análisis de Clusters Jerárquico Ascendente

Para agrupar sitios se usó el análisis de clusters jerárquico ascendente (ACJA) con transformación z de los datos, distancia euclidiana cuadrada como medida de disimilitud y método de agrupación de Ward. El ACJA (Figura 2) mostró tres grupos de sitios: 1) zona de ríos y presas con los sitios 1 al 7 y 10 (río Tarecuato, presa Guaracha, presa Jaripo, presa Abadiano, presa Las Fuentes, Santa Bárbara, río Jiquilpan y río Sahuayo); 2) zona del Lago con los sitios 8, 9, 11 y 12 (La Palma-Lago, Cojumatlán-Lago, canal Pajacuarán, canal La Palma) y; 3) zona de canales, sitios 13 al 16 (canales Jiquilpan, Cotijarán, Cuatro puntos y Sahuayo). El grupo 1 corresponde a sitios localizados en la parte alta de la CCM, mientras que los grupos 2 y 3 se localizan en la planicie (parte baja de la CCM). En general, los cuerpos de agua que conforman el grupo 1 presentaron los valores más bajos de las variables químicas y bacteriológicas analizadas, mientras que los mayores correspondieron a los grupos 2 y 3. Con esta base, se dividió la zona de estudio en dos áreas perfectamente delimitadas en cuanto a la concentración de contaminantes: parte alta y parte baja. Enseguida se analizan las variaciones estacionales observadas.

La CE promedio fue tres veces mayor en la parte baja en relación con la parte alta; una tendencia inversa se detectó para el pH, pero con diferencias ligeras,

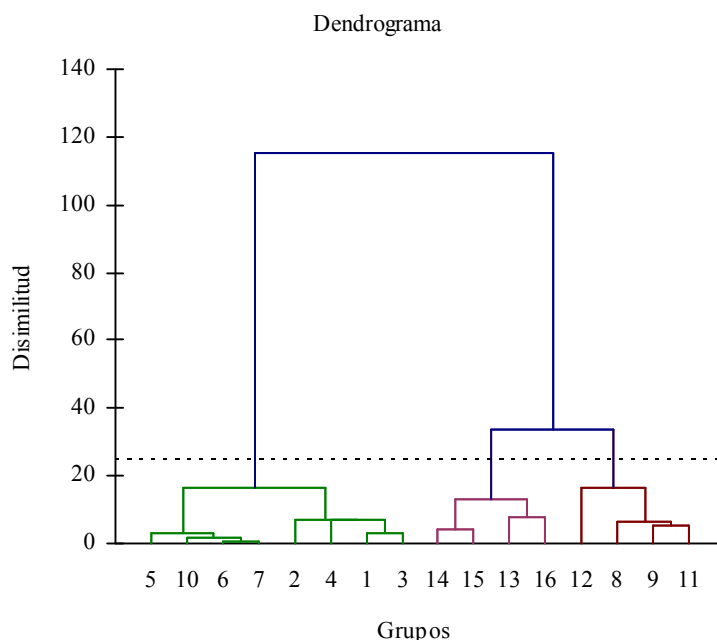


Figura 2. Agrupación de sitios bajo estudio mediante análisis de clusters jerárquico ascendente (ACJA).

con valores promedio de 7.35 para la parte baja y 7.55 para la parte alta.

La composición Ca-Mg (base equivalente-carga) predominó en los ríos Tarecuato, Jiquilpan, Sahuayo y las presas (63%), mientras que en el Lago de Chapala y en los canales dominó la composición Ca-Na, Mg-Na y Na, evidenciando un cambio en la química del agua hacia una composición sódica. Para los aniones, la predominancia fue $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ en la parte alta y $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ en la parte baja. El predominio de los iones Na y SO_4 en la parte baja se ilustra con el cambio en las relaciones Na/Ca y Cl/ SO_4 (Figura 3), con valores de 0.55 y 2.11 en la parte alta, y 5.80 y 0.87 en la parte baja, respectivamente.

El intercambio Na-Ca y Na-Mg que ocurre entre las soluciones (agua de riego) y la superficie de los minerales en los suelos, así como en las aguas residuales, son factores que se asocian al aumento relativo del Na aguas abajo (Velázquez-Machuca *et al.*, 2002). El SO_4 puede derivarse de los fertilizantes sulfatados y agroquímicos en general usados intensamente en la zona (CONAGUA, 2005). Las bacterias coliformes fecales se incrementaron unas sesenta veces en el Lago de Chapala y los canales en relación con los ríos, pasando de 1217 a 78 294 NMP/100 en promedio (Figura 3).

Estos valores fueron menores a los estimados por Zarco-Arista *et al.* (2006) para enterococos fecales,

con base en el número de cabezas de ganado registradas por municipio en la zona de estudio.

En relación con los metales, solamente el Fe fue ligeramente mayor en la parte alta (0.08 mg L^{-1}) que en la baja (0.05 mg L^{-1}); el Mn, Cd y Pb siguieron una tendencia inversa con aumento en sus concentraciones en la parte baja, pasando de 0.03, 0.04 y 0.05 a 0.17, 0.08 y 0.06 mg L^{-1} , respectivamente. El análisis de varianza indicó una diferencia altamente significativa ($P < 0.0001$) solamente para Fe; la comparación de concentraciones medias (prueba de Tukey) mostró seis contrastes significativos (4-1, 4-8, 4-15, 12-1, 12-8 y 12,15) aunque no se asociaron estos sitios a la parte alta o baja de la zona. Posiblemente la presencia de Fe esté relacionada con los minerales erosionados en la serranía que son acarreados a las presas y ríos; los suelos de estos lomeríos son predominantemente de color rojizo lo que indica la presencia de óxidos de Fe III (Brady y Weil, 2002). El Mn es un indicador de procesos de reducción en los cuerpos de agua (Stumm y Morgan, 1996) que, en este caso, pueden estar asociados al vertido de aguas residuales y la disminución consecuente del oxígeno disuelto aguas abajo. El B aumentó de 0.16 a 0.37 mg L^{-1} en la parte baja, en tanto que el P pasó de no detectable a 0.57 mg L^{-1} .

De acuerdo con De Anda-Sánchez y Shear (2006), la concentración media de P en el Lago de Chapala,

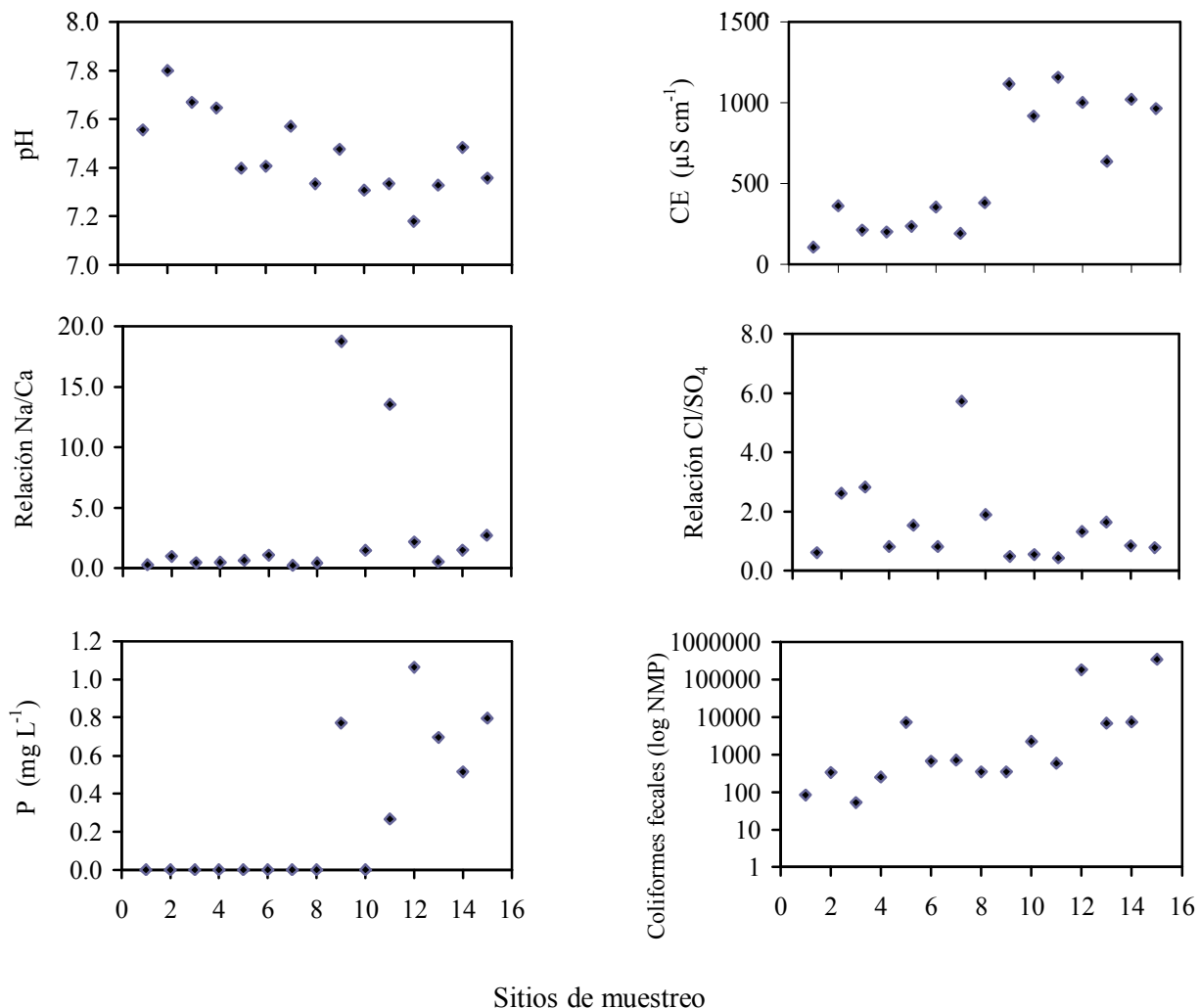


Figura 3. Comportamiento de las variables químicas y microbiológicas en las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala, Michoacán. Los sitios 1 a 8 corresponden a la parte alta (ríos y presas) y 9 a 16 a la parte baja (canales y Lago).

sitios La Palma-Cojumatlán, fue de 0.45 a 0.69 mg L⁻¹ en 1996, valores que son similares a los obtenidos en este trabajo.

Índice de Calidad de Agua (ICA)

En este trabajo, se seleccionaron siete variables para integrar un ICA a partir de los agrupamientos obtenidos para los diferentes factores en el análisis de componentes principales: CE, B, Na (F1, drenajes agrícolas), P, CF (F2, aguas residuales domésticas), Pb y Cd (F3, geología). Se incluyó también el pH. Los valores del ICA para 15 sitios de muestreo se indican en el Cuadro 3.

De los 15 sitios y las tres fechas de muestreo resultaron 45 valores de ICA; de estos, el 44.5% mostraron buena calidad del agua (ICA = 0-33), 53.3%

de calidad moderada (ICA = 34-66) y 2.2% de baja calidad (ICA > 66). Por sitios de muestreo, los menores valores de ICA y por consiguiente mejor calidad del agua fueron manantial Tarecuato y presas Jaripo, Guaracha y Abadiano (ICA = 13, 21, 23 y 23, respectivamente); la menor calidad de agua correspondió al Lago de Chapala y los canales. En general, el gradiente que se observó en la calidad del agua, medido a través del ICA, fue: ríos y presas < canales y drenes < Lago de Chapala.

Es de notar que en el manantial Tarecuato se detectaron coliformes fecales en las tres fechas de muestreo; probablemente éstos son derivados de los drenajes domésticos del poblado de Tarecuato, los cuales se vierten en barrancas cercanas y que la escorrentía puede arrastrar hasta el manantial. En el caso del río Jiquilpan, éste recibe aguas arriba las descargas

Cuadro 3. Índice de calidad del agua (ICA) por zona y sitio de muestreo.

Zona	Sitio	Periodo de muestreo			Media
		Abril 2, 2008	Diciembre 4, 2008	Mayo 24, 2009	
Ríos y presas	Tarecuato	11	16	12	13
	Presa Guaracha	23	18	26	23
	Presa Jaripo	25	13	26	21
	Abadiano	29	13	28	23
	Las Fuentes	37	11	34	28
	Santa Bárbara	37	12	35	28
	Jiquilpan río	40	22	38	34
	Sahuayo río	40	12	37	30
	Gran media				25
Canales y drenes	Canal Pajacuarán	47	37	48	44
	Canal Jiquilpan	51	36	55	47
	Canal Cotijarán	42	15	55	37
	4 puntos	55	22	58	45
	Canal Sahuayo + 4 puntos	67	18	63	50
	Gran media				45
Lago	La Palma Lago	54	52	50	52
	Cojumatlán Lago	65	19	59	48
	Gran media				50

domésticas de unos 2000 habitantes ($\approx 4 \text{ L s}^{-1}$ de aguas residuales) de los poblados de Abadiano, Santa Bárbara y Tres Ríos; la actividad ganadera que se realiza en esta zona también genera aportes importantes de contaminantes bacteriológicos (Zarco-Arista *et al.*, 2006). El río Sahuayo se ve influenciado también por descargas domésticas de una parte del poblado de Abadiano, por la actividad ganadera y el tiradero de basura en una de las barrancas cercanas a la corriente.

La más baja calidad del agua en los canales y el Lago se deriva del intenso uso antropogénico de los flujos que circulan en estos cuerpos de agua. Los canales bajo estudio conducen las aguas de retorno agrícola de unas 20 000 ha (CONAGUA, 2005) y los drenajes domésticos de los principales centros urbanos de la zona (Jiquilpan, Sahuayo, Villamar, Emiliano Zapata, Venustiano Carranza, La Palma, Cojumatlán); éstos en conjunto albergan una población de unos 110 000 habitantes (INEGI, 2005) que pueden generar unos 200 L s^{-1} de aguas residuales. Estas descargas, a su vez, son derivadas al Lago de Chapala y contribuyen a disminuir su ICA.

La variación temporal del ICA siguió la tendencia: abril \approx mayo > diciembre. La mejor calidad del agua en diciembre (bajo ICA) probablemente sea resultado de la menor temperatura y evapotranspiración, así como

mayor escorrentía en relación con los meses de abril y mayo. Tsegaye *et al.* (2006) observaron que el incremento en la temperatura del suelo y del aire causó una significativa degradación de la calidad del agua; esto se atribuyó a que la liberación y transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua están relacionados con el volumen de escorrentía, la cual depende, entre otros factores, de la lluvia, temperatura del aire y del suelo y la evaporación.

Siete de las ocho variables seleccionadas se correlacionaron positivamente con el ICA (Cuadro 4). La CE fue, en base al valor del coeficiente de correlación, la variable que influyó en mayor medida sobre la calidad del agua superficial en la zona. Otras variables importantes en el ICA fueron la concentración de Pb, P total y Cd, coincidiendo con los resultados de Tsegaye *et al.* (2006). La Figura 4 muestra la regresión para el ICA y la CE, donde se observa que ésta última explica el 65.3% de la variación.

Las variables ambientales que mostraron una relación altamente significativa con el ICA ($P < 0.0001$) se usaron para calcular la ecuación de regresión. El modelo fue altamente significativo, resultando la expresión:

$$\text{ICA} = 10.9 + 0.019\text{CE} + 99.3\text{Pb} + 94.5\text{Cd} + 5.5\text{P}$$

$$r^2 = 0.953$$

Cuadro 4. Coeficiente de correlación para variables químicas y coliformes fecales (CF) y el índice de calidad de agua.

	Variables							
	pH	CE	Na	Pb	Cd	B	P	CF
r	-0.03	0.81***	0.56***	0.77***	0.64***	0.39**	0.54***	0.38**

** $P = 0.01$; *** $P < 0.0001$.

La significancia de las variables incluidas en el modelo de regresión fue < 0.0001 (CE, Pb, Cd) y 0.003 (P).

CONCLUSIONES

La concentración de los contaminantes en las aguas superficiales de la Ciénega de Chapala se incrementó aguas abajo como consecuencia del vertido de drenajes agrícolas y aguas residuales. El mayor aumento fue para la conductividad eléctrica (CE), coliformes fecales (CF) y P total. El cambio en las relaciones iónicas Na/Ca y Cl/SO₄ aguas abajo indicó una tendencia hacia la composición Na-SO₄ de estas aguas. De acuerdo con los valores de ICA calculados, el 44 y 53% de los sitios bajo estudio presentaron buena y moderada calidad

de agua, respectivamente. La mejor calidad de agua se registró en la zona de ríos y presas con poca influencia de actividades antropogénicas, mientras que la más baja calidad correspondió al Lago de Chapala. Las variables que se asociaron significativamente con el índice de calidad del agua (ICA) en el modelo de regresión, y que corresponden a los principales contaminantes, fueron la CE, Pb, Cd, B, P y CF, de las cuales la CE explicó una proporción del 65% de la varianza total. En orden de importancia, los drenajes agrícolas y las aguas residuales son las principales fuentes de contaminantes en la zona. El control de estos contaminantes requiere el tratamiento de las aguas residuales y de drenaje agrícola generadas en la zona, así como la protección de las fuentes de agua de buena calidad.

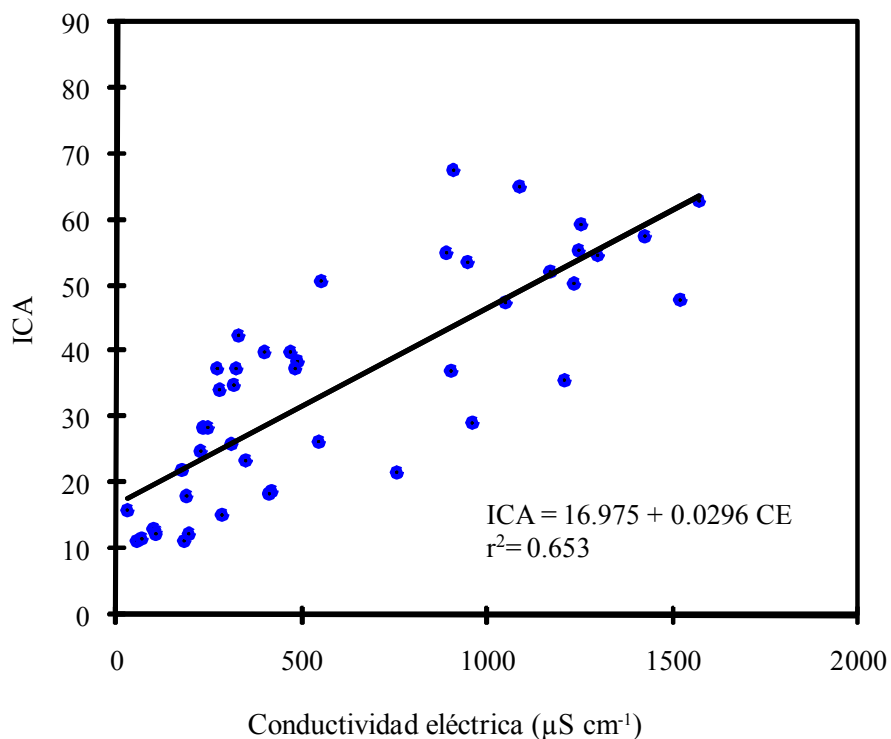


Figura 4. Relación entre el índice de calidad de agua (ICA) y la conductividad eléctrica (CE).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el Instituto Politécnico Nacional a través el Proyecto SIP 20090290.

LITERATURA CITADA

- Addinsoft. 2009. XLSTAT herramienta estadística. (Consulta: mayo 10, 2009).
- Aguillón, J. E., C. Alatorre, C. Cruickshank, B. Gamiño, J. L. Martínez, R. Mendoza, I. Monje, R. Solís y M. Tripa. 2005. Diagnóstico energético e hidráulico del estado de Michoacán. IE-UNAM, CIDEM. Morelia, Mich., México.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1989. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO. Roma, Italia.
- Baird, C. 2001. La purificación del agua contaminada. pp. 475-517. *In: Química ambiental*. C. Baird y X. Doménech A. (eds.). Reverté. Barcelona, España.
- Bordalo, A. A., W. Nilsumranchit, and K. Chalermwat. 2001. Water quality and uses in the Bangpakong river (Eastern Thailand). *Water Res.* 35: 3635-3642.
- Boyacioglu, H. and H. Boyacioglu. 2007. Surface water quality assessment by environmetric methods. *Environ. Monit. Assess.* 131: 371-376.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, N. J. USA.
- Cohn, P. D., M. Cox, and P. S. Berger. 1999. Health and aesthetic aspects of water quality. pp. 1-86. *In: Letterman, R. D. (ed.). Water quality and treatment. A Handbook of community water supplies*. American Water Works Association. McGraw-Hill. New York, NY, USA.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Plan director para la modernización integral del Distrito de Riego 024 Ciénega de Chapala, Michoacán. Sahuayo, Michoacán, México.
- De Anda-Sánchez, J. y S. Shear. 2006. Calidad del agua y eutrofización en el Lago de Chapala. pp. 144-145. *In: H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- Dinius, S. H. 1987. Design of an index of water quality. *Water Resour. Bull.* 23: 833-848.
- Eaton, A. D., L. S. Clesceri, E. W. Rice, and A. E. Greesberg. 2005. Standard Methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association Washington, DC, USA.
- Flores-Martínez, A., M. González-Osorio y C. Rodríguez-Ortega. 2005. Calidad del agua. pp. 101-127. *In: Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005*. SEMARNAT. México, D. F.
- Garrido-Pérez, A., H. Cotler-Ávalos y C. Enríquez-Guadarrama. 2006. Geomorfología y suelos. pp. 12-13. *In: H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- Hansen, A. M. and M. van Afferden. 2001. Toxic substances. Sources, accumulation and dynamics. pp. 95-121. *In: A. M. Hansen y M. van Afferden (eds.). The Lerma-Chapala watershed: Evaluation and Management*. Kluber Academic/Plenum Press. New York, NY, USA.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). Censo de población y vivienda 2005. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=est&c=10215>. (Consulta: octubre 3, 2009).
- Lindeman, M. A. 2004. Exploring the effects of urban and agricultural land use on surface water quality. Denver annual meeting. Paper no. 72-9. Geological Society of America abstracts with programs. Denver, CO, USA:
- Mejía-Maravilla, E., F. Rosales-Cristerna, J. A. Rojas-García y C. Molina-Segura. 2006. Evaluación de la calidad del agua. pp. 100-103. *In: H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- Moreno-Sánchez, R.; F. Díaz-Barriga y S. Devars. 1999. Mecanismos de toxicidad y de tolerancia a los metales pesados. pp. 11-40. *In: Cervantes, C. y R. Moreno-Sánchez (eds.). Contaminación ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos*. A.G.T. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación 24/junio/1996. México, D. F.
- Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994. Determinación de bacterias coliformes. Técnicas del número más probable. Diario Oficial de la Federación 15/agosto/1994. México, D. F.
- Said, A., D. K. Stevens and G. Sehlke. 2004. An innovative index for evaluating water quality in streams. *Environ. Manage.* 34: 406-414.
- Sarkar, Ch. and S. A. Abbasi. 2006. Qualidex-A new software for generating quality indice. *Environ. Monit. Assess.* 119: 201-231.
- Sedeño-Díaz, J. E. y E. López-López. 2006. La calidad del agua en las presas. pp. 150-154. *In: H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- SEDUE (Secretaría de Desarrollo urbano y Ecología). 1989. Acuerdo en por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. DOF 13/dic/1989. México, D. F.
- Silva-García, J. T., R. Rodríguez C., S. Ochoa-Estrada, and S. López D. 2002. Lake Chapala and the cienega aquifer: chemical evidence of their hydraulic communication. *Geofísica Intern.* 41: 63-73.
- Sotelo-Nuñez, E. I. 2006. Recomendaciones técnicas del INE por sub-cuenca. pp. 163-187. *In: H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta*. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- Stambuk-Giljanovic, N. 2003. Comparison of dalmatian water evaluation indices. *Water Environ. Resear.* 75: 388-405.
- Stumm, W. and J. Morgan. 1996. Aquatic chemistry. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.

- Tsegaye, T., D. Sheppard, K. R. Islam, A. Jonson, W. Tadesse, A. Atalay, and L. Marzen. 2006. Development of chemical index as a measure of in-streamwater quality in response to land-use and land cover changes. *Water Air Soil Pollut.* 174: 161-179.
- Uribe-Luna, J. 2006. Geología. pp. 10-11. *In:* H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.
- Velázquez-Machuca, M. A., M. Ortega-Escobar, J. Kohashi-Shivata, A. Martínez-Garza y N. García. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del mezquital, Hidalgo, México. *Terra* 20: 459-464.
- Zarco-Arista, A.E., A. J. Lima, Y. López-Vidal y M. Mazari-Hiriart. 2006. Calidad microbiológica del agua. pp. 131-139. *In:* H. Cotler-Ávalos, M. Mazari-Hiriart y J. de Anda-Sánchez (eds.). Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala. Construyendo una visión conjunta. SEMARNAT-INE-UNAM. México, D. F.