

DOI: 10.24850/j-tyca-14-05-09

Artículos

## **Evaluación de la calidad fisicoquímica y elementos traza en el agua del río Cupatitzio, Michoacán**

## **Evaluation of the physical and chemical quality and trace elements of water in Cupatitzio River, Michoacán**

Felipe Mendoza-Mora<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3915-1127>

Gustavo Cruz-Cárdenas<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5256-4612>

José Teodoro Silva<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4516-6461>

Salvador Ochoa-Estrada<sup>4</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8933-2882>

Dioselina Álvarez-Bernal<sup>5</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5946-7292>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Michoacán, COFAA, Jiquilpan, Michoacán, México, [mendozamorafj@hotmail.com](mailto:mendozamorafj@hotmail.com), [fmendozam2000@alumno.ipn.mx](mailto:fmendozam2000@alumno.ipn.mx)

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Michoacán, COFAA, Jiquilpan, Michoacán, México, [guscruz@ipn.mx](mailto:guscruz@ipn.mx)



<sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Michoacán, COFAA, Jiquilpan, Michoacán, México, jsilvag@ipn.mx

<sup>4</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Michoacán, COFAA, Jiquilpan, Michoacán, México, sochoae@ipn.mx

<sup>5</sup>Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR unidad Michoacán, COFAA, Jiquilpan, Michoacán, México, dalvarezb@ipn.mx

Autor para correspondencia: Felipe de Jesús Mendoza-Mora, mendozamorafj@hotmail.com, fmendozam2000@alumno.ipn.mx

## Resumen

En México, alrededor del 90 % de los ríos más importantes están altamente contaminados, principalmente de aguas residuales, lo cual resulta en problemas de salud humana. El presente trabajo tiene como objetivo determinar la calidad del agua del río Cupatitzio. Para ello se determinaron 20 sitios de muestreo en temporadas de lluvias (agosto de 2016) y secas (mayo de 2017); 31 elementos traza (ET), y 15 parámetros fisicoquímicos. Se calcularon tres índices de calidad: índice de calidad del agua (ICA), índice de contaminación (ICO) e índice canadiense (CCME WQI); se hizo un análisis estadístico para asociar variables. Los resultados se reportaron como sección de cuenta alta, media y baja. Para el tiempo de lluvias, los índices de calidad indicaron que la peor calidad se encuentra en la cuenca media debido a la presencia de aguas residuales y lixiviados de un relleno sanitario; en estiaje, la baja calidad se extiende hasta la cuenca baja. Los elementos traza Fe, Al y P se presentan en altas concentraciones en las cuencas



media y baja. Cabe destacar que pueden estar asociados con plaguicidas empleados en huertas de aguacate. Por último, los análisis estadísticos presentan una asociación entre baja calidad, poco oxígeno disuelto y la presencia de embalses. Debido a lo anterior, el agua del río no es apta para el uso y consumo humano.

**Palabras clave:** índice de calidad del agua canadiense, río Cupatitzio, métricas ambientales, parámetros fisicoquímicos, índice de contaminación del agua, elementos traza, contaminación del agua.

## Abstract

In Mexico, around 90 % of the rivers are polluted mainly from wastewater resulting in human health issues. This work is aimed at determining the water quality of Cupatitzio River; 20 sampling sites (SS) were determined in rainy (August 2016) and dry (May 2017) seasons; 31 trace elements (TE) were obtained and 15 physicochemical parameters; three quality indices were calculated: Water Quality Index (WQI), Pollution Index (IC) and the Canadian Council of Ministers of the Environment, Water Quality Index (CCMEWQI). Statistical analysis was conducted to associate variables. Results show for the rainy season, the quality indices indicates that the worst quality is found in the middle watershed due to the wastewater and leachate from a landfill; in the dry season, low quality reaches the low watershed. High concentrations of Fe, Al and P trace elements are found in the middle and lower watershed. It is worth mentioning that they may be associated with the pesticides used in avocado orchards. Finally, analyses show an association between poor quality, low



dissolved oxygen and the presence of reservoirs. Therefore, the river water is not fit for human use and consumption.

**Keywords:** Canadian Water Quality Index, Cupatitzio River, environmental metrics, physicochemical parameters, pollution index, trace elements, water pollution.

Recibido: 17/05/2021

Aceptado: 01/04/2022

## Introducción

La intensificación de las prácticas agrícolas, la insuficiencia en el saneamiento de aguas residuales, metales pesados, nitratos y nitritos son agentes contaminantes de gran impacto en los organismos acuáticos y en la salud humana, que provocan enfermedades transmitidas por el agua, principalmente cáncer (Arain *et al.*, 2014). Otro factor de impacto a la calidad del agua es la contaminación difusa proveniente de las prácticas agrícolas, cuya actividad ha aumentado en la última década debido a la demanda de comercio internacional, al que se le atribuye la cuarta parte de las emisiones de N a nivel global (Liu *et al.*, 2018b). La calidad del agua superficial se puede evaluar con diversas metodologías, y mediante diferentes indicadores, por ejemplo: parámetros fisicoquímicos, que a su vez se pueden evaluar mediante índices de calidad del agua, normas de calidad o estadística multivariada; indicadores biológicos, como el conteo de especies bentónicas; e indicadores microbiológicos, los cuales cuantifican



patógenos, como coliformes fecales (Espinal, Sedeño, & López, 2013; López-Hernández, Ramos-Espinosa, & Carranza-Fraser, 2007; Storaci-Koschelov, Fernández-Silva, & Smits-Gunta, 2013). Por otra parte, el impacto en la calidad del agua es posible estimarlo de manera indirecta mediante simulación de modelos hidrológicos, evaluación de la erosión de suelos o incluso por índices de vegetación (Abbaspour *et al.*, 2015; Ouyang, Hao, Skidmore, & Toxopeus, 2010).

En México, el panorama de la calidad del agua es crítico, ya que de los 50 ríos más relevantes del país, el 94 % se considera altamente contaminado, según lo reporta la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2014). Otro ejemplo es el presente caso de estudio, el río Cupatitzio, que nace dentro del Parque Nacional Barranca del Cupatitzio en la ciudad de Uruapan, Michoacán.

Estudios previos en el río Cupatitzio han analizado su calidad mediante análisis biológicos, como el conteo de macroinvertebrados, conteo de organismos planctónicos, cuantificación de parámetros fisicoquímicos y aplicación de normas nacionales como la NOM-127-SSA1 (1994) (Ortega-Murillo, Díaz-Martínez, Alvarado-Villanueva, & Hernandez-Morales, 2012; Pérez-Munguia, Aguilera-Ríos, & Mora-Guerrero, 2006); sin embargo, aún no se han empleado índices fisicoquímicos que pueden expresar la calidad del agua de forma numérica, lo que permite su comparación con otros cuerpos de agua, como sugieren Silva *et al.* (2013) al aplicar el ICA para determinar la calidad del agua superficial en el río Duero, Michoacán.

Entre las actividades de impacto ambiental que se han presentado en la cuenca del Cupatitzio destaca lo siguiente: cambio de uso de suelo forestal por monocultivo de aguacate, que conlleva la pérdida de

biodiversidad; uso excesivo de agroquímicos que, a su vez, contaminan el cuerpo de agua; sobreexplotación de acuíferos, y descargas de aguas residuales sin tratamiento (Bravo *et al.*, 2009; Villafán-Vidales & Ayala-Ortiz, 2014). Estos antecedentes son consecuentes de un aumento en el arrastre de suelo, transporte de nutrientes al agua y por tanto degradación de la calidad del cuerpo de agua.

El río Cupatitzio tiene una gran relevancia en la región, pues sirve de abastecimiento de agua potable para la ciudad de Uruapan; también alimenta 11 presas de riego agrícola (22 550 ha de cultivo) y tres presas para generación de energía eléctrica pertenecientes a la Comisión Federal de Electricidad (Conagua, 2012). Otro aspecto relevante desde el punto de vista cultural y recreativo es que el río Cupatitzio nace dentro del Parque Nacional Barranca del Cupatitzio, un área natural protegida de gran atractivo turístico (CNANP, 2006; Ortega-Murillo *et al.*, 2012).

Dada la importancia del río, es necesario conocer el estado actual de la calidad de sus aguas y fuentes de contaminación. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la calidad fisicoquímica del agua del río Cupatitzio, principales tributarios y embalses.

El presente estudio se llevó a cabo en octubre de 2017, en el Laboratorio de Aguas del Centro de Investigación Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional, unidad Jiquilpan, Michoacán, Mexico.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La cuenca del río Cupatitzio pertenece a la Región Hidrológica No. 18 (Río Balsas). Se localiza en la parte centro-occidente del estado de Michoacán, abarcando los municipios de Uruapan (80 % de la cuenca), Gabriel Zamora, F. J. Múgica, Nuevo Parangaricutiro y Parácuaro. La cuenca está ubicada geográficamente entre las coordenadas extremas 102° 02' 22" W, 19° 59' 55" N y 19° 05' 24" N, 102° 06' 46" W; con un área de 78 260 ha y una altura media de 1 425 msnm. La parte alta y media de la cuenca atraviesa el sistema volcánico transversal de este a oeste, encontrando pendientes entre 15 y 60 %, y barrancas que alcanzan pendientes de 100 %. En la parte alta delimita con cerros de hasta 3 380 msnm, como El Pílon, Capén y La Virgen; en la parte centro, El Burro (2 700 msnm), Cocucho (3 000 msnm) y El Santísimo (3 280 msnm); la cuenca media baja delimita con los cerros El Chino, La Cruz, La Charanda y El Colorado (2 100, 2 300, 2 200 y 2 120 msnm, respectivamente). En la parte baja, la cuenca tiene una altitud de 320 msnm y es abierta en dirección sur (Navia-Antezana, 2008). Los principales tipos de suelo en la cuenca son andosol en la cuenca alta; luvisol y acrisol en la cuenca media, y regosol y vertisol en la parte baja. El clima es húmedo en la parte alta y subhúmedo en la baja, con abundantes lluvias en verano. Entre los usos de suelo y vegetación se encuentran los bosques de pino, encino, pino-encino, bosque mesófilo de montaña, selva baja caducifolia, agricultura tradicional, cuerpos de agua y asentamientos humanos (INEGI, 2014).

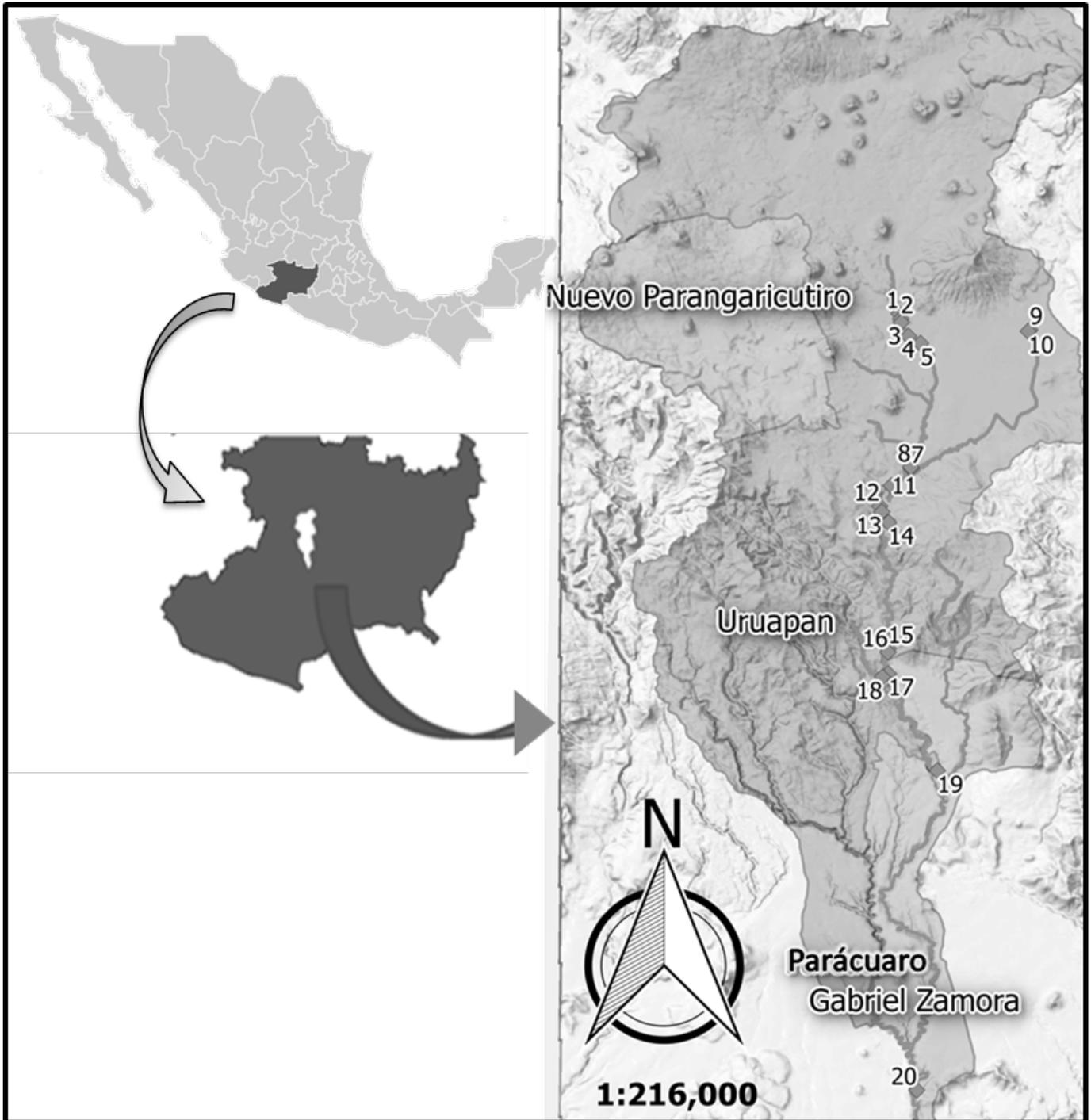


## Estaciones de muestreo

Sobre el río se establecieron 20 estaciones de muestreo (Tabla 1, Figura 1) con base en cuatro criterios: 1) accesibilidad y seguridad al punto de interés; 2) presencia de embalses o infraestructura sobre el caudal principal; 3) principales afluentes o efluentes, y 4) fuentes de contaminación puntual o difusa, como descargas residuales o agricultura intensiva cercana al cauce de estudio. El muestreo se llevó a cabo en dos periodos: muestreo 1 (M1) época de lluvias en agosto de 2016, y muestreo 2 (M2) en época seca, en mayo de 2017. En ambas ocasiones, el muestreo se efectuó de las 9:00 a.m. a las 5:00 p.m.

**Tabla 1.** Nombre y coordenadas de los sitios de muestreo, cuenca alta (EM 1 a 10), cuenca media (EM 11 a 15) y cuenca baja (EM 16 a 20).

EM	X	Y	Z	Nombre	Observaciones
1	807177	2150978	1700	Rodilla del Diablo	Nacimiento del río
2	807263	2150720	1666	El Reveladero	Manantial
3	807287	2150549	1679	El Puente	Parque nacional centro
4	807629	2149874	1630	Parque Lineal	Salida del parque nacional
5	808203	2149512	1610	Puente Manuel Ocaranza	Calle Manuel Ocaranza
6	806320	2146052	1544	La Pinera	Presa
7	807868	2143245	1532	Zumpimito descarga	Presa
8	807852	2143321	1526	Zumpimito instalaciones	Presa
9	813274	2150279	1596	Santa Bárbara	Manantial
10	813197	2150205	1599	Caltzontzin	Presa
11	806970	2142375	1466	Tzararacua	Cascada
12	806441	2141333	1376	Matanguarán	Presa
13	806546	2141056	1376	Matanguarán canal	Canal hidroeléctrica
14	806861	2140531	1356	Matanguarán lixiviados	Relleno sanitario
15	806950	2134216	1057	Barranca Honda río	Sobre el río
16	806950	2134044	1099	Barranca Honda canal	Canal hidroeléctrica
17	806982	2132970	897	Jicalán	Presa
18	806707	2132795	885	Jicalán-río	Río Jicalán
19	809350	2128152	760	El Abrevadero	Presa
20	808659	2112158	902	Puente el Marqués	Sobre el río



**Figura 1.** Mapa del área de estudio y estaciones de muestreo.

## Descripción de los sitios de muestreo

Los sitios 1, 2, 3 y 4 se ubican dentro del Área Natural Protegida Barranca del Cupatitzio, un bello paisaje rocoso con aguas claras poco profundas (1 m de profundidad y 2.5 de ancho); antes de salir del área protegida hay bombas de agua que toman las aguas del río para abastecer a la ciudad de Uruapan. Siguiendo el río aguas abajo se ubica el punto 4 sobre un parque lineal, donde comienza a hacerse más profundo; el punto 5 se sitúa en las calles de la ciudad de Uruapan donde el río pasa debajo de un puente; hacia las afueras de la ciudad el punto 6 se ubica en la presa La Pinera, un lugar turístico que destaca por su paisaje boscoso y el río Cupatitzio formando un humedal.

Los sitios 7 y 8 presa Zumpimito es una central eléctrica que retiene parte del río Cupatitzio, así como descargas de aguas residuales proveniente de la ciudad de Uruapan; el agua de la presa se canaliza y se aprovecha para la generación de energía eléctrica. Los sitios 9 y 10 son lugares turísticos, donde nace el río Santa Bárbara y sus aguas forman un humedal con paisaje boscoso, dichas aguas corren río abajo hasta incorporarse al río Cupatitzio en la cascada Tzararacua (punto 11), la cual es otro atractivo turístico en el centro de la cuenca media; ahí el paisaje es bello, pero el agua es algo turbia, con tonalidad café y un ligero olor desagradable; en este punto el río tiene entre 9 y 12 m de ancho y solo 1.5 m de profundidad.

El punto 12 es una presa llamada Matanguarán; parte de sus aguas pasan a un canal (puntos 13 y 16) para después aprovecharse en otra central hidroeléctrica; el punto 14 es una esorrentía de agua que proviene de la parte alta de un cerro donde se ubica el relleno



sanitario de la ciudad de Uruapan; desde ese punto, en época de lluvias, el agua que escurre desciende unos 250 m hasta llegar al río.

Barranca Honda (punto 15) es una zona de pendiente pronunciada ( $> 40\%$ ); no obstante, las prácticas agrícolas de producción de aguacate se llevan a cabo sobre la pendiente, lo que facilita el arrastre de nutrientes al río. Los puntos 17 y 18 pertenecen al río Jicalán, un tributario del río Cupatitzio, y sus aguas se unen justo en la presa del mismo nombre; el punto 18 es una pequeña represa que canaliza agua del río a un canal de riego; el punto 20 es el final del río Cupatitzio, que da origen al río El marqués; este punto se sitúa bajo un gran puente, aquí la corriente es fuerte y tiene una profundidad media de 2.5 m y un ancho de 5 m; el agua es más clara que en cuenca media, pero no más que en la cuenca alta.

## Parámetros fisicoquímicos y elementos traza

Para cada sitio se determinaron ocho parámetros fisicoquímicos (PFQ). En campo se empleó un multisensor Hidrolab modelo DS5, este equipo es robusto, cuenta con ocho sensores, los cuales se calibran de forma individual: temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y oxígeno disuelto (OD). Posteriormente se tomó una muestra de dos litros para analizar en laboratorio con base en las indicaciones de cada norma citada: alcalinidad (Alc) (NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001), dureza total (Dur) (NMX-AA-072-SCFI-2001, 2001), fósforo total (P) (NMX-AA-029-SCFI-2001, 2001), sólidos suspendidos totales (SST) (NMX-AA-034-SCFI-



2015, 2015), demanda química de oxígeno (DQO) (NMX-AA-030/1-SCFI, 2012) y demanda biológica de oxígeno a cinco días (DBO<sub>5</sub>) (NMX-AA-028-SCFI-2001, 2001). Además, se determinaron 31 elementos traza (ET) mediante espectrometría de masas por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-Masas). El equipo empleado pertenece al Laboratorio de Geología Aplicada de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Estos elementos son los siguientes: Li, B, Al, P, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, I, Ba, Hg, Tl, Pb y U. Cabe mencionar que para la segunda sesión de muestreo (secas) no se realizó el análisis de elementos traza; por otra parte, las EM 7 y 8 (presa Zumpimito) y 14 (Matangarán lixiviados) no se pudieron evaluar debido a la ausencia de esorrentía.

## Evaluación de contaminantes presentes en agua e índices de calidad

Se evaluaron los límites permisibles de contaminantes en agua (LPCA) para uso y consumo humano de acuerdo con dos normas mexicanas: CE-CCA-001 (1989) y NOM-127-SSA1 (1994).

A partir de los PFQ (parámetros físico químicos) se calcularon tres índices: índice de calidad del agua (ICA) basado en Conesa y Fernández (1993) (Ecuación (1)); índice de contaminación (ICON) de Backman, Bodiš, Lahermo, Rapant y Tarvainen, 1998) (Ecuación (2)); y el índice canadiense Canadian Council of Ministers of the Environment, Water Quality Index (CCMEWQI) (Davies, 2006) (Ecuación (3)):



$$ICA = \sum_1^n (w * i) / \sum_1^n W \quad (1)$$

Donde  $n$  es el enésimo parámetro de cada estación de muestreo;  $w$ , el peso asignado a cada parámetro;  $i$ , los valores asignados a cada observación según los intervalos según  $w$ . Los rangos de medida de este índice pueden tomar valores entre 0 y 100, siendo 0 indicativo de la menor calidad y 100 de excelente calidad.

$$ICON = \sum_1^n \left( \frac{ob}{lim} \right) - 1 \quad (2)$$

Donde  $n$  es la enésima observación de la estación de muestreo;  $ob$ , el valor numérico de cada observación;  $lim$ , el límite señalado por la norma de calidad pertinente para cada parámetro (LPCA) dados en m/l generalmente. Este índice puede tomar valores mayores o menores que 0, siendo los valores negativos indicativos de la mejor calidad; es decir menor contaminación.

$$CCMEWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1.732} \right) \quad (3)$$

Donde:

$F1 = \left( \frac{npf}{np} \right) * 100$ : es el número de parámetro fuera del límite permisible ( $npf$ ), según la norma pertinente, sobre el número de parámetros evaluados ( $np$ ) por 100.

$F2 = \left(\frac{nof}{not}\right) * 100$ : número total de observaciones fuera de límite (*nof*) permisibles según la norma pertinente, sobre el número de observaciones total (*not*) por 100.

$F3 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{not} \left(\frac{of}{lim}\right) - 1}{not}\right)$ : sumatoria de la razón entre la observación que no cumple el límite permisible (*of*) sobre el límite permisible (*lim*) menos 1. Esta cantidad sobre el número de observaciones totales (*not*). Este índice puede tomar valores entre 0 y 100, siendo 0 indicativo de la menor calidad y 100 de excelente calidad.

## Análisis estadísticos

Los resultados se procesaron y analizaron mediante *R-software* (Chambers & Colleagues, 2023), calculando matriz de correlación, análisis de componentes principales y clúster jerárquico aglomerativo.

## Cartografía digital y análisis espacial

Empleando el *software* libre QGIS (QGIS Development Team, 2014) se generaron mapas del uso de suelo y vegetación (USV). Este proceso se llevó a cabo mediante el complemento de clasificación semiautomática de Congedo (2016), para lo cual se utilizaron datos de los sensores remotos de los satélites Landsat 7 y 8 de los periodos 1997, 2009 y 2016; con una precisión de 30 m (USGS, 2016), además del modelo digital de elevación para mejorar la precisión de los mapas (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2010). Se agruparon 863 459 puntos en las

siguientes clases: bosque de pino-encino (BPE), vegetación secundaria (VS), agricultura (CU) y zona poblada (ZP). El algoritmo empleado fue distancia de Mahalanobis debido a su gran precisión de hasta 94.27 % (Singh, Singh, & Vásquez, 1997). Posteriormente se realizó el mapeo de los tres índices, a fin de analizar la dispersión espacial de la calidad del agua.

## Resultados

Los resultados para los PFQ y ET para M1 y M2 se presentan en su totalidad en la Tabla 2.1, Tabla 2.2 y Tabla 2.3. Luego se tiene la Tabla 3 con el conjunto de parámetros encontrados fuera de los LPCA marcados por las normas nacionales antes mencionadas. Dicha tabla presenta el valor promedio de cada parámetro, mínimo, máximo, valor del LPCA y estaciones que se encontraron fuera de estos límites.

**Tabla 2.1.** Parámetros fisicoquímicos para el muestreo 1 de lluvias (agosto de 2016).

Muestreo 1 (época de lluvia agosto de 2016)														
EM	T	CE	Ph	TDS	Cl	NH4	NO3	OD	Alc	Dur	P	DQO	DBO	SST
1	16.13	140	7.02	70.7	24.37	0.585	2.22	10	70	38.45	0.74	2	1.885	18.56
2	16.02	131.6	7.28	66.46	33.93	0.57	2.48	10.4	62	42.295	0.68	46	4.265	40
3	16.25	147.7	7.68	74.59	27.3	0.525	3.29	11	64	42.295	0.73	46	4.68	33.34
4	16.39	161.6	7.81	81.61	42.24	0.58	3.32	11	62	38.45	0.81	46	2.815	31.67
5	16.56	164	7.83	82.82	34.39	0.6	3.16	11.2	64	49.985	0.77	49	1.52	27.69
6	17.34	185.6	7.8	93.73	49.01	0.96	5.8	10.1	74	49.985	0.76	44	4.5	43.33
7	21.37	362.7	7.55	183.18	84.35	8.775	15.53	9.2	162	61.52	1.36	105	5.45	50
8	17.57	108.3	7.73	54.69	50.01	1.09	20.5	10.4	86	53.83	2.57	78	4.715	35.71
9	16.09	131.7	6.44	66.51	18.9	0.435	4.22	5.9	148	49.985	0.69	38	3.38	35
10	21.26	160.5	8.48	81.06	29.02	0.62	5.63	9.4	62	46.14	1.18	78	4.045	45
11	19.08	217	7.91	109.59	18.95	1.71	2.38	5.7	75.9	61.52	0.88	43	5	25.77
12	19.57	215.8	7.38	108.98	51.31	1.2	7.34	7.3	78	49.985	0.75	27	4.13	7.18
13	19.11	219.4	7.53	110.8	50.09	1.82	8.29	10.4	78	49.985	0.92	25	4.47	35.71
14	20.88	1.7	8.43	0.85	532.2	100.16	14.95	2.5	NA	NA	2.83	590	1.32	200
15	25.12	208.3	8.07	105.2	14.13	0.93	1.82	10.2	72	49.985	0.86	69	2.9	584
16	20.93	209.6	8.21	105.85	14.72	0.965	2.36	8.8	12	61.52	0.96	75	2.78	202
17	23.45	199.4	7.62	100.7	8.09	0.75	1.41	9.5	72	57.675	0.86	62	2.695	142
18	22.92	188.3	8.09	95.1	4.96	0.69	0.8	10.5	80	57.675	0.73	97	4.555	102
19	21.11	207.6	8.13	104.84	13.25	0.86	2.25	10.1	83.9	42.295	0.88	22	4.215	118
20	27.5	209.6	8.28	105.85	10.1	0.99	1.41	11	98	57.675	0.72	22	3.91	110

**Tabla 2.2.** Elementos traza para M1.

EM	Li	B	Al	P	Sc	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As
1	5.48	12.9	25.21	155.9	6.04	4.59	21.5	1	38.37	0.01	0.01	4.21	14.58	0.04
2	4.31	8.62	0.01	130.3	6.11	3.98	20.9	1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	4.83	15.57	75.9	189.6	7.53	7.53	23.3	0.37	73.52	0.01	0.01	22.87	94.32	0.19
4	4.51	13.79	95.03	212.7	7.05	8.68	23.1	0.66	263.4	0.01	0.01	5.93	64.87	0.4
5	4.61	17.35	82.06	354.5	6.25	6.63	21.5	0.01	72.46	0.01	0.01	5.3	54.74	0.01
6	4.32	16.53	136.5	449.8	7.46	9.9	22.1	0.28	124.9	0.01	0.01	3.88	69.36	0.33
7	1.36	85.04	570.1	1491	3.2	17.48	6.04	0.14	1147	0.49	0.71	5.49	24.57	0.36
8	2.69	8.06	217.3	142.4	6.49	9.52	21.1	0.14	150.9	0.01	0.01	2.9	11.84	0.01
9	2.56	8.01	116.0	805.9	6.45	11.51	18.5	0.86	214.7	0.01	0.08	2.84	133.8	0.37
10	3.86	8.92	48.28	264.3	7.44	5.98	21.1	0.16	45.63	0.01	0.01	4.08	9.72	0.24
11	3.22	17.36	265.7	417	6.34	13.73	21.2	0.78	474.8	0.61	1.8	2.95	16.68	1.02
12	3.16	16.13	370.4	364.3	6.02	16.27	17.9	0.01	332.2	0.01	0.04	3.62	10.86	0.36
13	3.02	20.81	53.29	610	6.79	15.42	19.9	0.55	594.1	0.05	0.38	11.31	93.7	0.08
14	0.82	494	271.7	1592	5.87	70.56	27.4	47.25	3367	9.34	21.51	31.16	68.09	6.26
15	2.91	26.16	185.5	263.7	7.02	11.5	17.1	0.19	230.7	0.01	0.01	6.49	24.5	0.14
16	2.31	18.11	143.6	269	7.05	9.49	17.8	0.11	186.0	0.01	0.01	4.75	8.58	0.53
17	0.98	15.57	207.1	115.1	5.75	6.52	8.75	8.86	583.5	0.01	1.21	1.66	22.6	0.01
18	0.29	11.99	219.7	172.6	6.7	8.17	6.38	0.01	176.7	0.01	0.1	3.16	431.36	0.02
19	1.31	15.38	489.3	302.1	6.89	16.37	13.6	0.01	423.3	0.05	0.18	5.08	26.05	0.01
20	1.82	11.21	481	175.7	6.42	7.25	15.2	0.04	324.4	0.01	0.36	5.18	10.62	0.24

**Tabla 2.3.** Parámetros fisicoquímicos, muestreo 2, época de secas (mayo de 2017).

Muestreo 2 (época seca, mayo de 2017)														
EM	T	CE	pH	TDS	Cl	NH4	NO3	OD	Alc	Dur	P	DQO	DBO	SST
1	17.1	148	7.52	74	24.09	0.16	36.83	5.6	30.15	49.99	0.51	0	1.3	0.66
2	16.3	164	7.53	82	23.7	0.08	23.87	9.15	31.5	46.14	0.41	0	1.2	0.9
3	16.3	153	7.94	76	23.62	0.06	25.84	9.42	31.5	57.68	0.43	0	1	1.3
4	16.3	164	7.79	82	36.75	2.59	36.46	8.85	31.5	46.14	0.71	0	0.97	1.5
5	26.4	166	7.8	83	24.59	0.24	29.06	9.6	32.85	49.99	0.42	35	15.89	0.8
6	16.6	199	8.13	99	24.15	0.15	35.1	9.2	36	48.06	1.69	55	12.85	30.8
7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
9	22	155	6.81	77	24.22	0.15	67.69	7.67	28.35	42.3	0.48	33	9.17	5.14
10	21.7	349	6.39	175	26.26	0.54	28.6	13.11	32.4	38.45	0.4	30	9	5.3
11	19.3	206	7.99	102	24.05	0.11	21.27	11.5	39.15	57.68	0.59	45	14.39	3.2
12	27.4	340	6.38	170	25.73	0.43	32.8	0.74	80.1	111.51	0.62	31	9	6
13	26.3	217	6.64	108	26.69	0.61	8.64	4.83	41.4	61.52	0.58	36	10.25	31.2
14	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15	20.57	166.6	6.69	75.58	44.15	2.73	21.62	4.52	26.44	39.79	0.55	44	9.3	5.1
16	22.6	177	7.05	84	24.27	0.13	18.65	5.67	42.3	57.68	0.51	76	10.15	3.2
17	25	243	6.57	120	28.17	0.88	21.18	3.9	40.05	61.52	0.52	39.67	14.96	2
18	28.6	235	6.51	117	24.62	0.19	8.44	5.5	54.45	65.37	0.27	32	9.75	2
19	20.4	200	6.74	100	26.35	0.52	38.63	6.8	36.9	61.52	0.53	52.5	13.35	5.6
20	29	380	7.1	254	28.86	1	21.69	5.81	86.4	80.75	0.53	21.33	14.08	9.6

**Tabla 3.** Parámetros fuera de límites permisibles en agua para M1 y M2.

Parámetro	$\bar{x}$	Mín	Máx	límite permisible	Estaciones fuera del límite permisible
<b>M1</b>					
Cl	55.6	5	532.2	250	14
NH <sub>4</sub>	6.24	0.4	100.16	0.5	Todas, excepto EM 9
NO <sub>3</sub>	5.46	0.8	20.5	5	6, 7, 8, 10, 12, 13 y 14
OD	9.23	2.5	11.2	>4	14
P	1.03	0.7	2.83	0.1	Todas
DQO	78.2	2	590	40	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18
SST	94.4	7.2	584	500	15
Al	0.2	0	0.57	0.02	Todas, excepto EM 2
Fe	0.44	0	3.36	0.3	6, 11, 12, 13, 14, 17, 19, 20
P	0.43	0.2	1.59	0.1	Todas
<b>M2</b>					
NH <sub>4</sub>	0.62	0.1	2.73	0.5	4, 10, 13, 15, 17, 19, 20
NO <sub>3</sub>	28	8.4	67.69	5	Todas
OD	7.17	0.74	13.11	>4	12
P	0.57	0.3	1.69	0.1	Todas
DQO	31.2	0	76	40	6, 11, 15, 16 y 19

OD = oxígeno disuelto; DQO = demanda química de oxígeno; SDT = sólidos disueltos totales.

## Descripción de parámetros para época de lluvias (M1)

La temperatura mostró un aumento conforme se desciende en la cuenca, esto se considera un comportamiento normal si se tiene en cuenta la influencia del clima regional. El pH, la conductividad y los sólidos disueltos totales de manera similar aumentaron conforme hay un descenso en la cuenca y ninguna estación excedió los LPCA. El aumento en CE, pH y TDS puede deberse a un acumulamiento de sales por la interacción fisicoquímica con rocas y sedimentos a lo largo del río (Carreño-de-León, Zarazúa-Ortega, Fall, Ávila-Pérez y Tejeda-Vega, 2018); el promedio de dichos parámetros fue de 178.52, 7.76 y 90.15, respectivamente. El  $\text{Cl}^-$  solo rebasó los LPCA en la EM 14. El ion amonio superó los LPCA en todas las estaciones de muestreo, excepto en la EM 9 (manantial Santa Bárbara); los nitratos mostraron su mayor concentración en la cuenca media, y valores bajos en la parte alta y baja de la cuenca. El oxígeno presentó valores mayores a  $4 \text{ mg l}^{-1}$  excepto en las EM 14, que tan solo presentó  $2.5 \text{ mg l}^{-1}$ . Alcalinidad, dureza y  $\text{DBO}_5$  tuvieron valores sumamente bajos con respecto a los LPCA. P y DQO rebasaron los límites en todas las EM. Los sólidos suspendidos totales mostraron un comportamiento creciente conforme se desciende en la cuenca, superando los LPCA solo en la EM 15 (Barranca Honda).

Los elementos traza, en general, presentaron valores muy bajos, excepto el Al, Fe y P, que superan los LPCA. El Al mostró una tendencia al aumento conforme se desciende en la cuenca; el Fe se presenta en mayores concentraciones en cuenca media y baja. El P, como se esperaba, rebasó los LPCA en todas las EM.

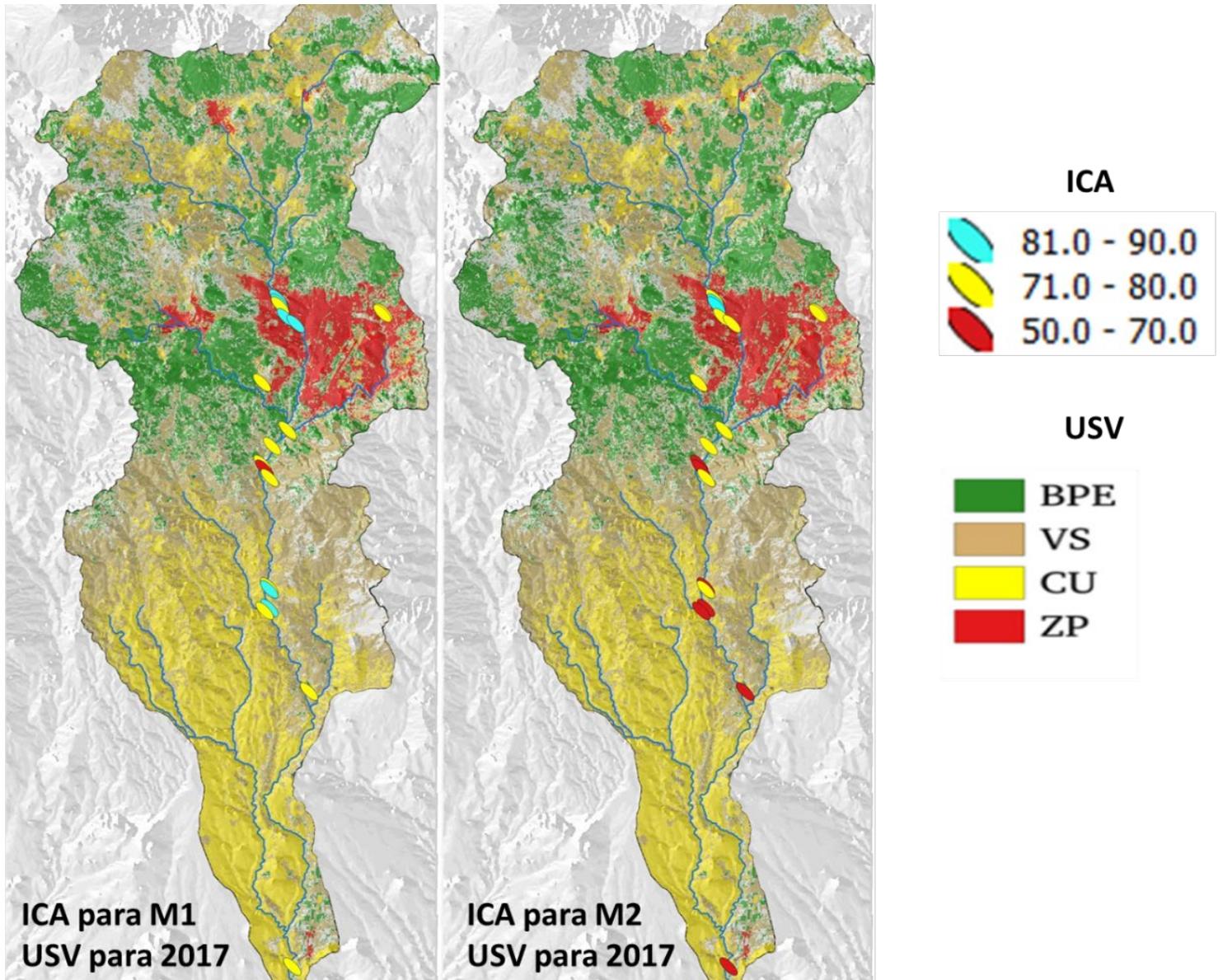


## Descripción de los parámetros para época de sequía (M2)

La temperatura en M2 tuvo un comportamiento variable debido a la variación en el volumen de agua en cada zona. El pH mostró valores entre 7 y 8 para cuenca alta, mientras que en la cuenca media y baja tendieron a un pH neutro. Las variables de CE, SDT y Cl<sup>-</sup> presentaron valores cercanos al promedio y muy por debajo de los LPCA en la mayoría de las EM. El amonio se mostró fluctuante, rebasando los LPCA en siete de las EM. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> tuvo valores altos, rebasando todas las EM, superando hasta cinco veces la media en época de lluvias. El OD presentó valores menores al muestreo en lluvias, sin embargo solo presentó una EM por debajo del límite mínimo (0.74 mg l<sup>-1</sup>, EM presa Matanguarán). Los parámetros alcalinidad y dureza muestran sus valores más altos en la cuenca media. Cabe destacar que el valor de alcalinidad alcanzó la mitad de los valores obtenidos en época de lluvias, mientras que la dureza permaneció muy similar en ambas épocas. El P, de nuevo, mostró una alta concentración y superó los LPCA en todas las EM. La DQO<sub>5</sub> presentó valores menores a M1, sin embargo también superó los LPCA para cinco EM (presa La Pinera, cascada Tzararacua, sobre el río en Barranca Honda, y presa El Abrevadero). Los SST presentaron valores muy bajos con respecto a los límites permisibles.

## Índice de calidad del agua

El ICA para el M1 tuvo un rango de 64 (EM13) a 85 (EM1) puntos. Los valores más bajos se registraron en la sección de cuenca media (promedio = 72.8). Mientras en la cuenca alta y cuenca baja, los valores promedio fueron 79.3 y 79.4, respectivamente. El ICA para el M2 tuvo un rango entre 54 (EM12) y 87 (EM2) puntos, obteniendo valores bajos en las cuencas media y baja (promedio = 66); mientras que en la cuenca alta el promedio fue de 79 puntos. En la Figura 2 se presenta la distribución espacial de los resultados del ICA para M1 e ICA para M2.



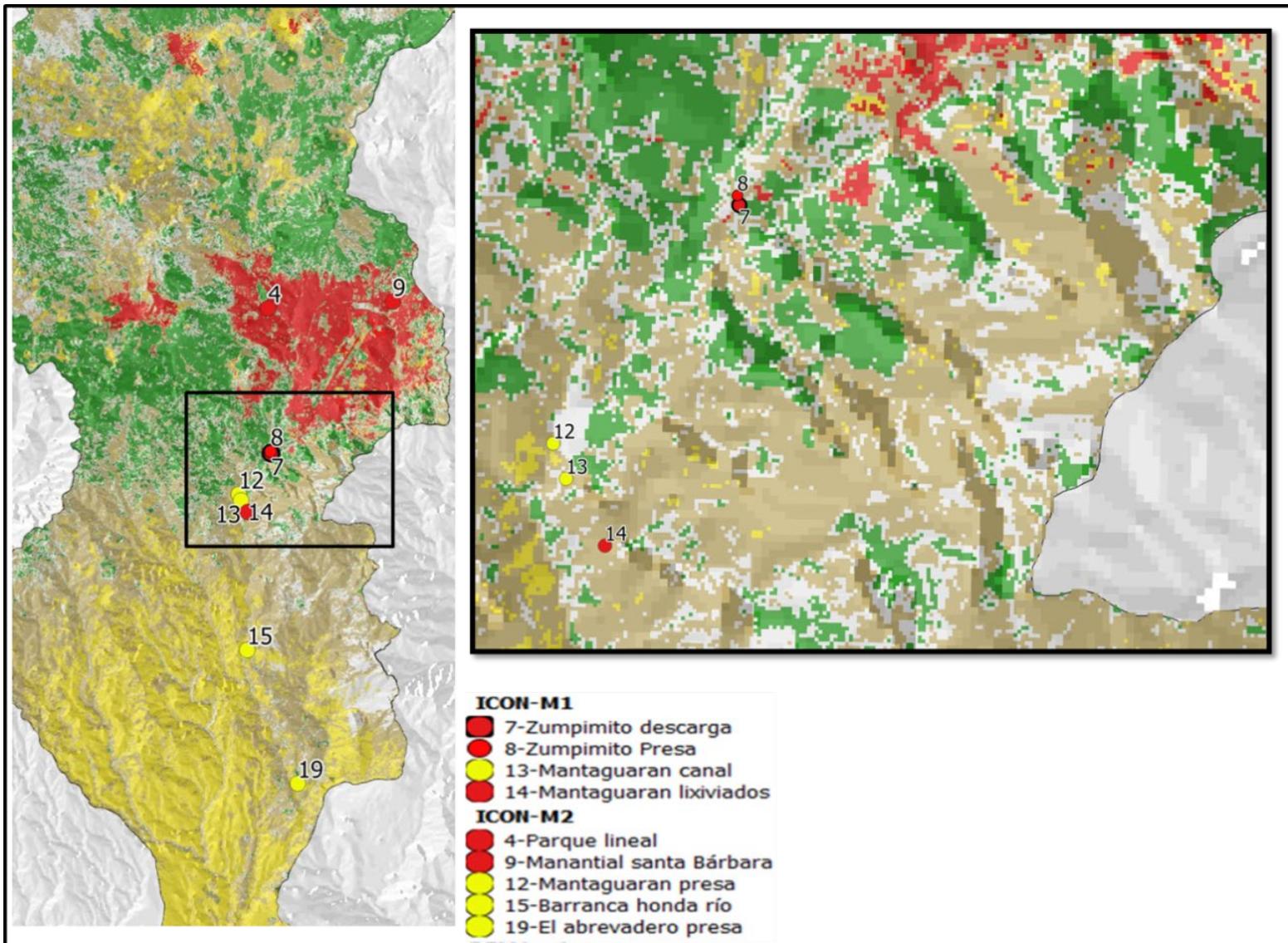
**Figura 2.** Índice de calidad del agua (ICA) en escala de colores sobre el mapa de uso de suelo y vegetación (USV) de la cuenca del río Cupatitzio (M1 y M2).

## Índice de contaminación

El ICON para el M1 obtuvo una estación con contaminación moderada, entre 0 y 3 puntos (EM 13), y tres estaciones con alto grado de contaminación (EM7, EM8 y EM14), mayores a tres puntos.

Para el ICON del M2 se obtuvieron tres EM con moderada contaminación (EM12, EM15 y EM19), y dos estaciones fuertemente contaminadas (EM4 y EM9).

Las EM no mencionadas en ambos muestreos representan zonas con bajo índice de contaminación, obteniendo valores menores a 0. En la Figura 3 se muestra el mapa del ICON para los periodos de muestreo.



**Figura 3.** Mapa de índice de contaminación para M1 y M2. Se tienen las estaciones de muestreo con moderada contaminación en amarillo y en rojo aquellas fuertemente contaminadas.

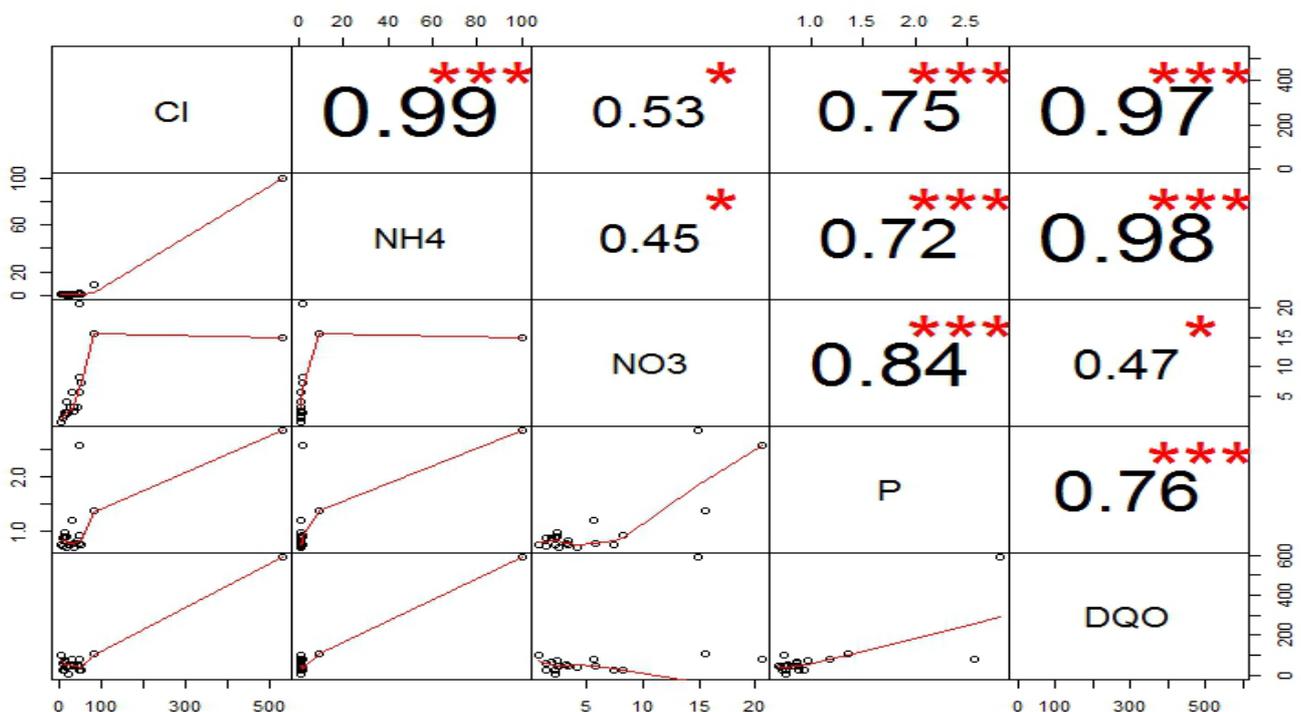
## Índice canadiense CCME WQI

Para M1 se evaluó la calidad de todo el cuerpo de agua, obteniendo 55 de 100 puntos, que representa mala calidad. Este resultado difiere de lo obtenido por el índice ICA, ya que si se promedian todos los sitios se tienen 78 puntos de 100 (buena calidad). No obstante, es fácil entender el resultado del CCME WQI si se observan y comparan entre sí los factores  $F1 = 36.36$ ,  $F2 = 21.36$  y  $F3 = 65.96$ , donde el primero es la cantidad de PFQ fuera de los LPCA (7 de 14); el segundo es la frecuencia con que se incumplen dichos límites (63 de 300); por último,  $F3$  indica qué tanto se superan los valores límite, por ejemplo, se superó 10 veces el valor límite para fósforo, 12 veces para amonio y 1.9 para DQO. Evidentemente  $F3$  tuvo el valor más elevado; en otras palabras, se obtuvo una baja puntuación de calidad debido a las altas concentraciones principalmente de fósforo y amonio.

Para M2 se obtuvieron 66 puntos, indicativo de calidad regular. Observando los factores  $F1 = 27.7$ ,  $F2 = 21.92$  y  $F3 = 47.54$ , puede decirse que el mayor impacto en la calidad del agua está dado por las cantidades de los contaminantes, como ocurrió en M1. Sin embargo, el índice canadiense en esta ocasión muestra una mejor calidad que en lluvias, lo cual se debió sobre todo a la disminución del factor  $F1$ , que corresponde a un número menor de PFQ fuera de los estándares (4 de 14).

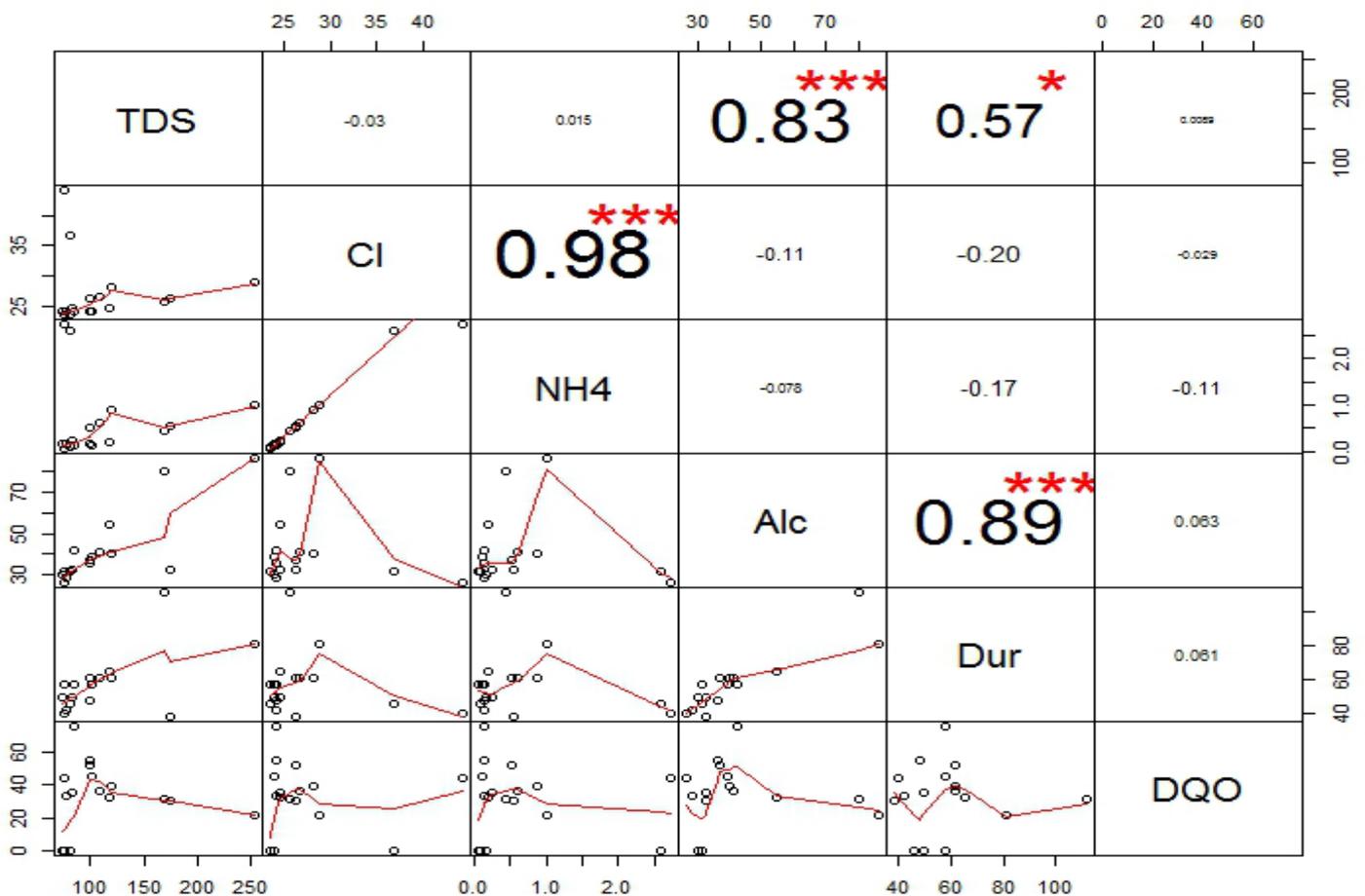
## Relación entre parámetros primer y segundo muestreo

Calculando la matriz de correlación para el muestreo 1 (MC-1) se obtuvieron los coeficientes más altos ( $r > 0.7$ ):  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , P y DQO (Figura 4). Cabe destacar que estos parámetros son los mismos que se presentaron fuera de los LPCA, lo que puede indicar que tienen un origen común.



**Figura 4.** Matriz de correlación MC-1. Se muestran los PFQ con un coeficiente de correlación de Pearson mayor 0.7 para el primer muestreo.

Para el muestreo 2, la matriz de correlación (MC-2) mostró que los PFQ correlacionados con  $r > 0.7$  fueron TDS,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Alc, Dur, DQO (Figura 5). A diferencia de MC-1, los parámetros en época de secas presentaron menor correlación entre sí y no coinciden con los parámetros fuera de los LPCA.



**Figura 5.** Matriz de correlación MC-2. Se muestran los PFQ con un coeficiente de correlación de Pearson mayor que 0.7 para el segundo muestreo.

## **Análisis de componentes principales (ACP)**

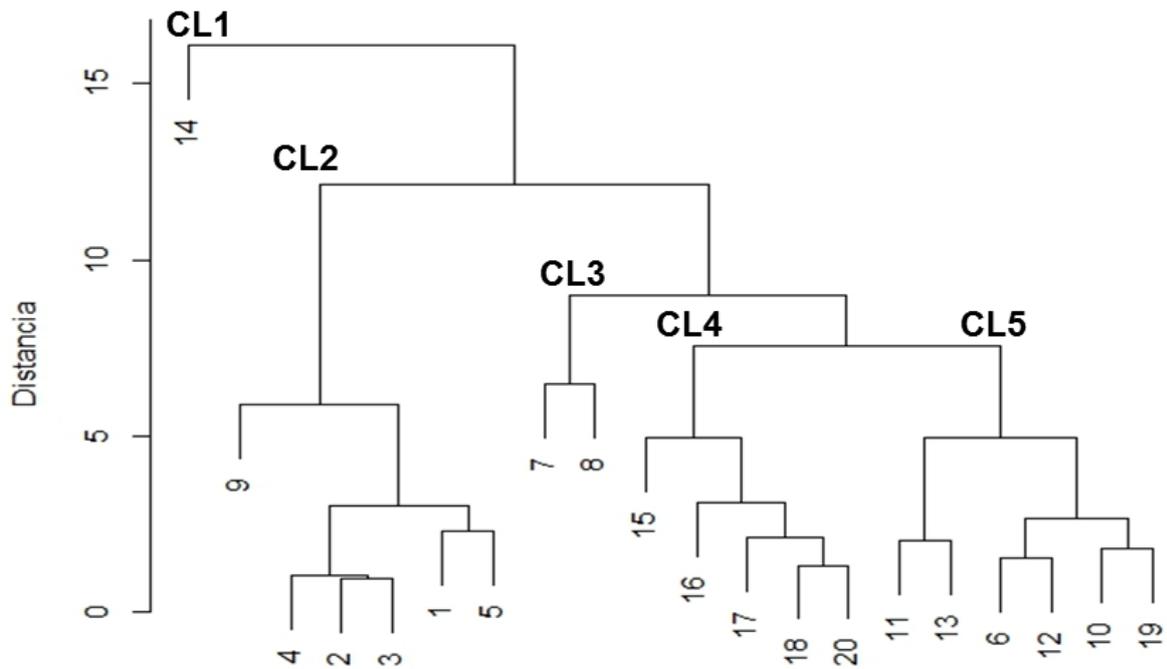
Se aplicó el ACP a la matriz de datos de ambos muestreos, obteniendo 14 componentes principales (CP) dadas las 14 variables originales. De estos 14 CP se tomaron los primeros siete para el análisis Clúster, ya que reúnen el 94 % de la variación de los datos originales (Tabla 4).

**Tabla 4.** Resumen de los componentes principales para los datos de los parámetros fisicoquímicos de los muestreos 1 y 2.

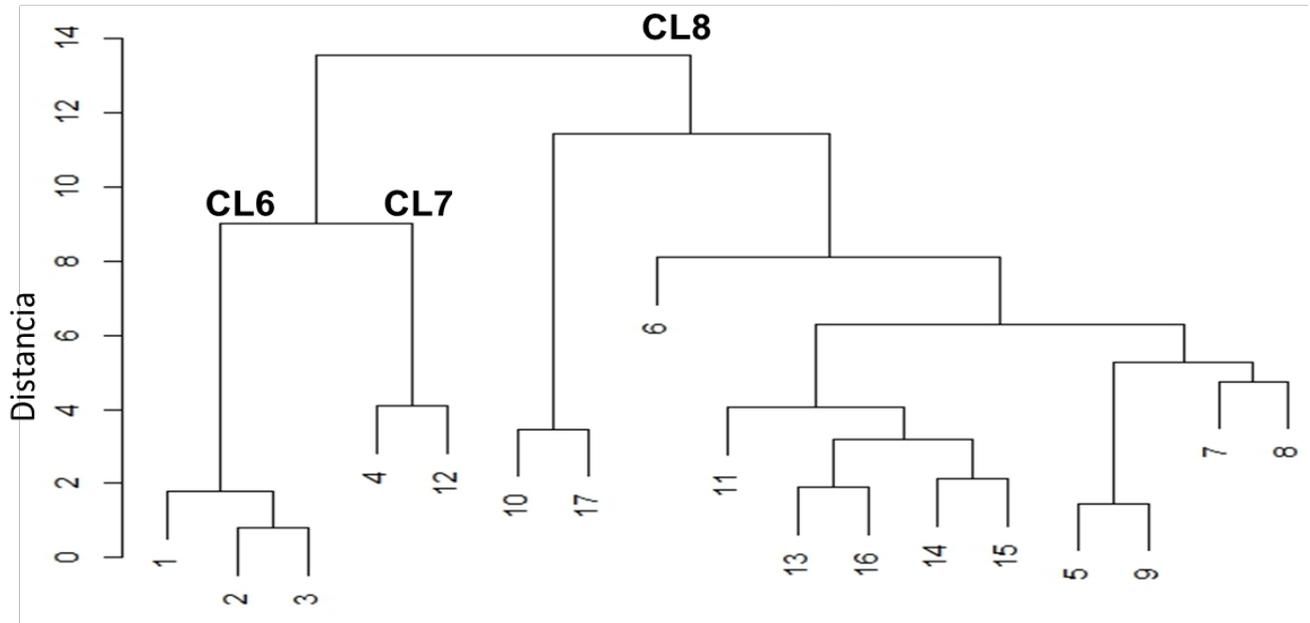
CP	Desviación estándar	Proporción de varianza	Proporción acumulada
<b>Lluvias</b>			
1	2.279	0.371	0.371
2	1.651	0.195	0.566
3	1.542	0.170	0.736
4	1.011	0.073	0.809
5	0.919	0.060	0.869
6	0.742	0.039	0.908
7	<b>0.693</b>	<b>0.034</b>	<b>0.943</b>
8	0.664	0.031	0.974
9	0.485	0.017	0.991
10	0.301	0.006	0.997
11	0.154	0.002	0.999
12	0.106	0.001	1.000
13	0.020	0.000	1.000
14	0.000	0.000	1.000
<b>Sequías</b>			
1	2.203	0.347	0.347
2	1.515	0.164	0.511
3	1.418	0.144	0.654
4	1.212	0.105	0.759
5	1.067	0.081	0.841
6	0.973	0.068	0.908
7	<b>0.806</b>	<b>0.046</b>	<b>0.955</b>
8	0.577	0.024	0.978
9	0.329	0.008	0.986
10	0.310	0.007	0.993
11	0.253	0.005	0.998
12	0.129	0.001	0.999
13	0.124	0.001	1.000
14	0.038	0.000	1.000

## Análisis Clúster

Se aplicó la técnica de análisis de clúster jerárquico por el método de Ward para ambos CP. Los dendogramas para M1 y M2 (D1, D2) que se muestran en las Figura 6 y Figura 7 indican la agrupación o clúster (CL) de las EM con base en la distancia euclidiana de sus datos.



**Figura 6.** Dendrograma D1 para M1.



**Figura 7.** Dendrograma D2 para el M2.

Para el D1, la EM 14 CL1 forma un solo conglomerado dadas sus características únicas; esta EM pertenece a la sección de cuenca media y posee el más alto ICON para M1. El CL3 conjunta las EM ubicadas en la presa Zumpimito, que presenta el segundo más alto ICON. El CL2 relaciona las EM de la cuenca alta, mientras que el CL4 agrupa todas las EM pertenecientes a la sección de cuenca baja. En estos dos últimos clúster se encontró buena calidad de agua y altos contenidos de OD. El CL5 agrupa las EM pertenecientes a embalses y presenta los niveles más bajos de OD, por lo que hay una relación entre embalses, mala calidad, escaso OD y zona de cuenca media.

El CL6, en su mayoría, muestra las EM de cuenca alta, pero no tiene similitud con otro clúster, tampoco hay punto de comparación entre los CL7 y CL8. En general, M2 no presenta patrones en la dispersión de sus parámetros como se observaron en M1.

## Discusión

En el primer muestreo se observó que los parámetros fuera de los límites permisibles no solo presentaron altas correlaciones entre sí sino valores máximos en las mismas estaciones de muestreo (EM 7 y EM 14). Este hecho sugiere que dichos contaminantes tienen su mayor impacto en la calidad del agua debido a la presencia de las descargas residuales y los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Uruapan. Ello también explicaría la presencia de elementos traza, como el Fe y el B, que tienen origen en descargas industriales, residuales, pinturas, textiles, barnices y piezas de electrónica (Hassan, Rahman, Saha, & Kamal, 2015; Velázquez, Pimentel, & Ortega, 2011). Por otra parte, el aluminio y su tendencia a la acumulación en la región baja de la cuenca se atribuye a los altos insumos de plaguicidas aplicados en huertas de aguacate, como lo reportan Bravo *et al.* (2009), destacando el fosforo de aluminio para el control de *Dendroctonus mexicanus*, lo cual explicaría las grandes cantidades de Al y P encontradas en el cuerpo de agua.

Aun cuando la mayor parte de contaminantes tuvieron origen al menos parcialmente en aguas residuales, los parámetros  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , P y DQO superan los LPCA en sitios que no han sido impactados con dichas descargas (p. ej., el manantial Rodilla del Diablo en la parte más



alta de la cuenca), lo que puede estar relacionado con agricultura en las partes más altas de la cuenca e infiltración de nutrientes al acuífero, como lo sugieren De-Miguel-Fernandez y Vázquez-Taset (2006).

Conforme se desciende en la cuenca, la acumulación de aguas residuales y el aumento de sustancias nitrogenadas es notoria, sobre todo en la disminución del oxígeno disuelto y el incremento en la demanda química y biológica de oxígeno; por ejemplo la EM 11 tiene la más alta demanda biológica de oxígeno y el segundo valor más bajo de oxígeno. Dicho comportamiento puede estar relacionado con los procesos bioquímicos de nitrificación y desnitrificación llevado a cabo por bacterias nitrosomonas y nitrobacterias, respectivamente (De-Miguel-Fernandez & Vázquez-Taset, 2006; Torres-Bojorges, Hernández-Razo, Fausto-Urquieta, & Zurita-Martínez, 2017).

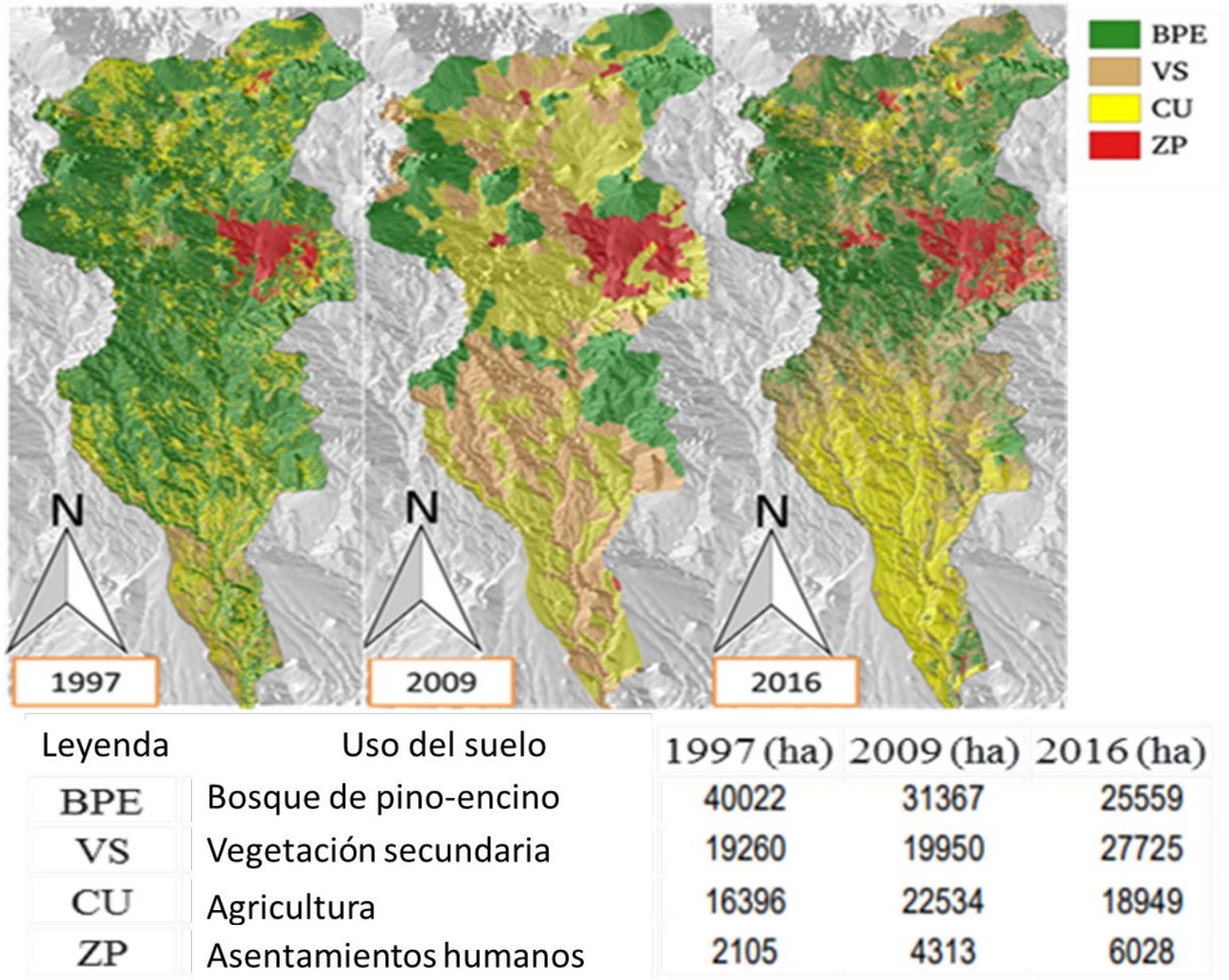
La DQO, por ejemplo, es un indicador de la presencia de materia biodegradable u oxidable (NMX-AA-030-2-SCFI-2011, 2011); por tanto, la oxidación del amonio puede contribuir a la demanda de oxígeno, al ser un proceso natural en cuerpos de agua (Bednarek, Szklarek, & Zalewski, 2014) y explicaría la alta demanda química de oxígeno encontrada en sitios sin impacto por agua residual.

El parámetro relacionado con la mejor calidad del agua fue el oxígeno disuelto, pues las EM con mayor calidad según el ICA son aquellas cuya concentración de oxígeno fue mayor; estas mismas EM se encontraron agrupadas en el análisis clúster (CI2 y CI4), mientras que los embalses agrupados en los CI3 y CI5 son los puntos con menor calidad y con más bajos niveles de oxígeno disuelto; en dichos puntos hay presencia de lirio acuático, que cubre la mayor parte de la superficie del embalse, y representa una barrera física que limita la

penetración del oxígeno al agua, tal como lo mencionan Carrión *et al.* (2012). Relacionado con lo anterior, Sharma, Meher, Kumar, Gautam y Mishra (2014) analizan la calidad del río Ganges, India, correlacionando los valores del ICA con los PFQ; encontraron correlación del 47 % entre OD y WQI, lo que puede indicar que hay un comportamiento similar para tal caso de estudio. Esta reacción muestra la importancia de la presencia de oxígeno disuelto para la oxidación de los contaminantes, tal como  $\text{NH}_4^+$ , que será oxidado a  $\text{NO}_3^-$  si hay suficiencia de oxígeno disuelto. Cabe mencionar que el ion nitrato es la forma más estable del nitrógeno y a la que tienden todas las sustancia nitrogenadas, y que la reducción de  $\text{NH}_4^+$  también tiene consumo de carbonatos que se encuentran en su forma hidrolizada como ácido carbónico; este consumo de  $\text{HCO}_3^-$  representa una disminución de alcalinidad y por tanto en el pH, comportamiento que se observó en la cuenca media y que coincide con los trabajos de De-Miguel-Fernandez y Vázquez-Taset (2006); y Pacheco-Ávila, Pat-Canul y Cabrera-Sansores (2002). Dicha condición se vio reflejada en los resultados de M1 y coincide con los resultados de SS1 (Murillo, Aguilla, Hernández y Díaz (2014).

Para M2, los valores de  $\text{NH}_4^+$  y P se redujeron un 30 %, en comparación con M1, esto puede estar relacionado con la ausencia de escorrentías superficiales, es decir, el arrastre de nutrientes y agroquímicos de suelos agrícolas y, por otra parte, los escurrimientos del relleno sanitario (Em14). Por el contrario,  $\text{NO}_3^-$  aumentó hasta ocho veces su concentración comparado con M1. En general, las altas concentraciones de nitratos en el río pueden deberse a tres situaciones. La primera es el cambio de uso de suelo, ya que Espinal *et al.* (2013) relaciona el incremento de la densidad poblacional y la intensificación

de las prácticas agrícolas con la eutrofización de los cuerpos de agua. En la Figura 8 se observa que esto ocurre, pues los asentamientos humanos en la cuenca están en aumento 4 % anual, mientras que las zonas forestales están disminuyendo 2 % cada año, lo cual coincide así con los reportes de la Comisión Nacional de Áreas Naturales protegidas (CNANP, 2006).



**Figura 8.** Mapas del uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Cupatitzio para los años 1997, 2009 y 2016.

Otro motivo por el cual puede darse un alza en los nitratos es la nitrificación, es decir, oxidación de amonio a nitritos, luego a nitratos

y en aguas subterráneas y superficiales debido a la infiltración de nutrientes provenientes de suelos agrícolas, como lo sugiere Rudolph (2015) y tal como estaría sucediendo en el primer punto, el manantial Rodilla del Diablo.

En la tercera situación, según Bravo *et al.* (2009), las concentraciones de nitratos pueden estar asociadas con los ciclos de fertilización y el manejo de los cultivos en la cuenca, que en caso de la zona aguacatera de Michoacán se han reportado hasta  $1 \text{ g l}^{-1}$  de nitratos en lixiviados fuera del alcance radicular en huertas de aguacate; estos nutrientes pueden infiltrarse al acuífero y acumularse.

Espinal *et al.* (2013), y López-Hernández, Ramos-Espinosa y Carranza-Fraser (2007) consideran que los estudios que emplean más de una métrica o técnica de evaluación ecológica son más eficientes en el análisis de datos. Por este motivo se emplearon tres índices que presentaron las siguientes ventajas: el índice ICA, a diferencia de los demás, permite de manera puntual e independiente evaluar cada estación de muestreo, destacando de esta forma la mejor calidad en los extremos de la cuenca. El índice de contaminación ICON, aun cuando también presenta una puntuación por EM, fue capaz de señalar de modo enfático las estaciones fuertemente contaminadas que el ICA no pudo señalar, por ejemplo: EM14 presentó 75/100 puntos para el ICA, considerados calidad regular, mientras que para el ICON obtuvo 219, lo que indica que dicha EM está fuertemente contaminada. El índice canadiense CCMEWQI, aun cuando otorgó un solo valor de calidad a todo el cuerpo ( $M1 = 55$  y  $M2 = 66$  puntos), brindó información única por medio de sus tres factores (F1, F2 y F3), especificando que fueron las alta concentración de las sustancias

fosforadas y nitrogenadas la principal causa de la degradación de la calidad del agua. Por último, se puede decir que las técnicas estadísticas empleadas son métricas ambientales ampliamente utilizadas en estudios de calidad del agua y su dispersión espacial (Juahir *et al.*, 2011), y aportaron dos importantes puntos de análisis: el primero fue la correlación entre parámetros fisicoquímicos mediante matriz de correlación; posteriormente se eliminó dicha correlación mediante análisis de componentes principales para finalmente analizar la relación entre estaciones de muestreo con la técnica de análisis clúster. Liu, Shen y Chen (2018), al igual que Mainali y Chang (2018), coinciden con el presente estudio en el empleo de técnicas estadísticas en conjunto con análisis del uso de suelo mediante sensores remotos para comprender la dispersión de la calidad del agua, así como el origen de los contaminantes.

## Conclusiones

El agua del río Cupatitzio resulta inapropiada para uso y consumo humano debido a su mala calidad, resultado principalmente de los altos niveles de fósforo, amonio, nitratos, hierro y aluminio en todos los sitios evaluados durante lluvias y época seca. Estos contaminantes sobrepasan los límites considerando la norma CE-CCA-001 (1989), por lo que no es apta para consumo humano.

Con base en los índices de calidad del agua, se puede concluir que el río Cupatitzio posee una calidad regular en sus aguas debido a sus altas concentraciones de contaminantes.



El fuerte impacto a la calidad del agua en la cuenca media se debe al aporte de aguas residuales y lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Uruapan; dichas fuentes aportan más del 70 % de las sustancias nitrogenadas y 50 % del fósforo total; el resto se origina en la escorrentía superficial.

En la cuenca baja, el mayor impacto se debe a la zona agrícola aguacatera, donde se aprecia el acumulamiento de Al, que de acuerdo con los antecedentes proviene de plaguicidas basados en fosforo de aluminio y se aplica en gran cantidad en huertas de aguacate.

La presencia de embalses se vio asociada con mala calidad de agua y bajos niveles de oxígeno disuelto, lo que es un indicio de eutrofización del cuerpo de agua; sin embargo no es un estado definitivo, por lo que pueden tomarse acciones correctivas y estratégicas para la recuperación de la calidad del agua del río Cupatitzio.

### Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), proyecto clave 266025. Agradecemos al Instituto Politécnico Nacional, unidad de Michoacán, por brindar las instalaciones y materiales para el análisis químico. Gracias también al Dr. J. Alfredo Ramos por su apoyo y contribución al presente trabajo.



## Referencias

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Arain, M. B., Ullah, I., Niaz, A., Shah, N., Shah, A., Hussain, Z.,..., & Kazi, T. G. (2014). Evaluation of water quality parameters in drinking water of district Bannu, Pakistan: Multivariate study. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 3-4(2015), 114-123. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2014.12.005>
- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., & Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental Geology*, 36(1-2), 55-64. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s002540050320>
- Bednarek, A., Szklarek, S., & Zalewski, M. (2014). Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming. Comparison of various denitrification biotechnologies. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(2), 132-141. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.01.005>
- Bravo, M., Sánchez, J., Vidales, J. A., Sáenz, J. T., Chávez, J. G., Madrigal, S., ... Venegas, E. (2009). *Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (primera). Uruapan, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Recuperado de [http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/libro\\_aguacate.pdf](http://www.inifapcirne.gob.mx/Revistas/Archivos/libro_aguacate.pdf)

- Carreño-de-León, C., Zarazúa-Ortega, G., Fall, C., Ávila-Pérez, P., & Tejeda-Vega, S. (2018). Evaluación de la toxicidad de los sedimentos del curso alto del río Lerma, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 117-126. Recuperado de <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.10>
- Carrión, C., León-Ponce-de, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*, 46(6), 609-620. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n6/v46n6a7.pdf>
- CE-CCA-001. (1989). *Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89*. Centro de Calidad Ambiental Expedición: Uninet. Recuperado de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989#gsc.tab=0)
- Chambers, J., & Colleagues. (2023). *The R Project for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation. Recuperado de <https://www.r-project.org/>
- CNANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2006). *Parque Nacional Barranca del Cupatitzio*. Recuperado de [https://simec.conanp.gob.mx/pdf\\_libro\\_pm/3\\_libro\\_pm.pdf](https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/3_libro_pm.pdf)
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2012). *Sistema de seguridad de presas*. Recuperado de [https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre\\_presa.aspx](https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx)
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2014). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/eam2014.pdf>
- Conesa, V., & Fernández, V. (1993). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (4ª ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.

- Congedo, L. (2016). *Semi-automatic clasification. Rome. Software para la digitalización y prosesamiento de imágenes satelitales (1.7)*. Recuperado de <https://plugins.qgis.org/plugins/SemiAutomaticClassificationPlugin/>
- Cruz-Cárdenas, G., Ortiz-Solorio, C. A., Ojeda-Trejo, E., Martínez-Montoya, J. F., Sotelo-Ruiz, E. D., & Licona-Vargas, A. L. (2010). Evaluation of four digital classifiers for automated cartography of local soil classes based on reflectance and elevation in Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 31(3), 665-679. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/01431160902894491>
- Davies, J.-M. (2006). Application and tests of the Canadian Water Quality Index for Assessing changes in water quality in lakes and rivers of Central North America. *Lake and Reservoir Management*, 22(4), 308-320. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/07438140609354365>
- De-Miguel-Fernandez, C., & Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO<sub>3</sub>) y nitritos (NO<sub>2</sub>) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería y Geología*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223517652002.pdf>
- Espinal, T., Sedeño, J. E., & López, E. (2013). Evaluación de la calidad del agua en la laguna de Yuriria, Guanajuato, México, mediante técnicas multivariadas: un análisis de valoración para dos épocas 2005, 2009-2010. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(3), 147-163.
- Hassan, M., Rahman, M. A. T. M. T., Saha, B., & Kamal, A. K. I. (2015). Status of Heavy metals in water and sediment of the Meghna River, Bangladesh. *American Journal of Environmental Sciences*, 11(6), 427-439. Recuperado de <https://doi.org/10.3844/ajessp.2015.427.439>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2014). *Portal de Información Geográfica-Conabio*. Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- Juahir, H., Zain, S. M., Yusoff, M. K., Hanidza, T. I. T., Armi, A. S. M., Toriman, M. E., & Mokhtar, M. (2011). Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 173(1-4), 625-641. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1411-x>
- Liu, J., Shen, Z., & Chen, L. (2018). Assessing how spatial variations of land use pattern affect water quality across a typical urbanized watershed in Beijing, China. *Landscape and Urban Planning*, 176, 51-63. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.04.006>
- Liu, W., Yang, H., Liu, Y., Kumm, M., Hoekstra, A. Y., Liu, J., & Schulin, R. (2018). Water resources conservation and nitrogen pollution reduction under global food trade and agricultural intensification. *Science of the Total Environment*, 633, 1591-1601. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.306>
- López-Hernández, M., Ramos-Espinosa, M. G., & Carranza-Fraser, J. (2007). Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*, 17(1), 17-30. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v17s1/v17s1a3.pdf>
- Mainali, J., & Chang, H. (2018). Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea. *Journal of Hydrology*, 564, 26-40. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.074>
- Murillo, M. R., Aguilla, M. E., Hernández, R., & Díaz, N. (2014). El perifiton de la subcuenca del río Cupatitzio, Michoacán, México. *Biológicas*, 16(2), 1-12.

- Navia-Antezana, J. (2008). Servicios ambientales: una opción para el desarrollo sustentable en la cuenca del Cupatitzio, Michoacán. En: Paré, L., Robinson, D., & González, M. A. (coord.). *Gestión de cuencas y servicios ambientales perspectivas comunitarias y ciudadanas*. Vol. 1. (pp. 163-184). México, DF, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología; Itaca; Raíces Sendas, A. C.; WWF. Recuperado de [https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/Gestion\\_de\\_cuencas\\_y\\_servicios\\_ambientales.\\_Perspectivas\\_comunitarias\\_y\\_ciudadanas.pdf](https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/Gestion_de_cuencas_y_servicios_ambientales._Perspectivas_comunitarias_y_ciudadanas.pdf)
- NMX-AA-028-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981)*. *Water analysis - Determination of the biochemical oxygen demand in natural, wastewaters (BOD<sub>5</sub>) and wastewaters treated - Test method*. Recuperado de <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>
- NMX-AA-029-SCFI-2001. (2001). *Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Norma mexicana*. Recuperado de <http://201.116.60.182/CONAGUA07/Noticias/NMX-AA-029-SCFI-2001.pdf>
- NMX-AA-030-2-SCFI-2011. (2011). *Análisis de agua - Determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba - Parte 2 - Determinación del índice de la demanda química de oxígeno método de tubo sellado a pequeña escala*. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>

- NMX-AA-034-SCFI-2015. (2015). *Norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 análisis de agua - Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). Water analysis - measurement of salts and solids dissolved in natural water, wastewaters and treated wastewaters - Test method.* Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf>
- NMX-AA-036-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-036-1980).* Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166776/NMX-AA-036-SCFI-2001.pdf>
- NMX-AA-072-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua - Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA072-1981) water analysis - Determination of total hardness in natural, wastewaters and wastewaters treated - Test method.* Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166788/NMX-AA-072-SCFI-2001.pdf>
- NOM-127-SSA1. (1994). *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.* Recuperado de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4866379&fecha=18/01/1996#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866379&fecha=18/01/1996#gsc.tab=0)
- Ortega-Murillo, M., Díaz-Martínez, N., Alvarado-Villanueva, R., & Hernández-Morales, R. (2012). Fitoplancton de la región litoral del río Cupatitzio, Michoacán, México. *Biológicas*, 14(2), 57-66.

- Ouyang, W., Hao, F., Skidmore, A. K., & Toxopeus, A. G. (2010). Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River. *Science of the Total Environment*, 409(2), 396-403. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.020>
- Pacheco-Ávila, J., Pat-Canul, R., & Cabrera-Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73-81.
- Pérez-Munguia, R.-M., Aguilera-Ríos, M., & Mora-Guerrero, J.-L. (2006). Monitoreo ambiental del río "Cupatitzio", en la cabecera de la microcuenca y dentro del Parque Nacional "Barranca del Cupatitzio", en la Ciudad. *Biológicas*, 8, 18-30.
- QGIS Development Team. (2014). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. Recuperado de <https://doi.org/http://www.qgis.org/>, <http://qgis.osgeo.org>. *Qgisorg*.
- RStudio\_Team. (2015). *The R Project for Statistical Computing. Software para el análisis estadístico (2.6.2)*. Viena, Austria: R Foundation. Recuperado de <https://www.r-project.org/>
- Rudolph, D. L. (2015). Groundwater quality within the agricultural landscape: Assessing the performance of nutrient BMPs. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 35(1), 21-22. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/gwmr.12106>
- Sharma, P., Meher, P. K., Kumar, A., Gautam, Y. P., & Mishra, K. P. (2014). Changes in water quality index of Ganges river at different locations in Allahabad. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 3-4, 67-76. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2014.10.002>
- Silva, J. T., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz-Cardenas, G., Escalera, C.,..., & López, M. (2013). Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 127-146.

- Singh, R., Singh, R., & Vásquez, R. (1997). ML parameter estimation and minimum distance classifier for texture analysis using wavelet transform. *Computers & Industrial Engineering*, 33(1-2), 449-452. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(97\)00134-4](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(97)00134-4)
- Storaci-Koschelov, V., Fernández-Silva, R., & Smits-Gunta, B. (2013). Evaluación de la calidad del agua del río cúpira (La Cumaca, estado Carabobo, Venezuela) mediante bioindicadores microbiológicos y parámetros físicoquímicos. *Interciencia*, 38, 480-488.
- Torres-Bojorges, Á. X., Hernández-Razo, N. A., Fausto-Urquieta, A. A., & Zurita-Martínez, F. (2017). Evaluación de tres sistemas de humedales híbridos a escala piloto para la remoción de nitrógeno. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 37-47. Recuperado de <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.03>
- USGS, United States Geological Survey. (2016). *United States Geological Survey*. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Velázquez, M. A., Pimentel, J. L., & Ortega, M. (2011). Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 27(1), 19-30.
- Villafán-Vidales, K. B., & Ayala-Ortiz, D. A. (2014). Responsabilidad social de las empresas agrícolas y agroindustriales aguacateras de Uruapan, Michoacán, y sus implicaciones en la competitividad. *Contaduría y Administración*, 59(4), 223-251. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0186-1042\(14\)70161-5](https://doi.org/10.1016/S0186-1042(14)70161-5)