

Evaluación de la calidad del agua mediante el índice de saprobiedad, en la Laguna Zumpango.**Evaluation of water quality through the index of saprobiedad, in Laguna Zumpango.****¹Raúl Arcos Ramos, Jafet Reyes Cardoso, Eduardo Méndez Ramírez, Miguel Ángel Antonio Gutiérrez Bailón.**¹Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Lab. de Contaminación AcuáticaDomicilio Institucional: Batalla 5 de mayo s/n Esq. Fuerte de Loreto Col. Ejército de Oriente
CDMX 09300. Correspondencia: biolar13@gmail.com

RESUMEN. Las cuencas hidrológicas forman parte de la vasta biodiversidad con la que México cuenta. Sin embargo, la creciente actividad humana, favorece el avance de la contaminación. La laguna de Zumpango presenta problemas de este tipo causados por la entrada de aguas residuales acelerando el proceso natural de eutrofización. Este estudio se enfocó en determinar su calidad del agua considerando los componentes físicos, químicos y biológicos, permitiendo determinar el avance eutrófico del sistema y establecer estrategias para su potencial recuperación. Se realizaron muestreos mensuales de marzo a noviembre de 2017 utilizando cinco puntos de monitoreo a dos niveles, se incluyeron: análisis nutrimental, identificación de los géneros y estudio de la diversidad fitoplanctónica mediante el índice de Shannon y Weiver. La laguna se clasificó mediante el índice de Saprobiedad y se realizaron pruebas estadísticas univariadas y multivariadas. Los resultados establecen que la laguna de Zumpango es somera y polimíctica, el índice de Saprobiedad determina que la laguna es un sistema Mesotrófico, los parámetros físicos y químicos determinaron que la principal causa de contaminación es la materia orgánica, produciendo las condiciones ideales para el crecimiento del fitoplancton. El análisis multivariado; indicó, que los nutrientes son significativos en el comportamiento del sistema. Por tanto, se concluye que la laguna de Zumpango es un sistema contaminado (*Alfa-meso saprobio*), abundante en nutrientes y fitoplancton (*Phormidium*, *Nitzschia*, *Microcystis*).

Palabras claves: Eutrofización, Contaminación, Cuenca, Orgánica, Fitoplancton.

INTRODUCCIÓN

Las aguas continentales son un recurso fundamental para el desarrollo y supervivencia de las poblaciones humanas, debido a las propiedades únicas presentes de este grupo (Ríos, Lagos, y Lagunas), características que permiten el consumo humano y el desarrollo de diversas actividades económicas (Rodier, 1990). La laguna de Zumpango ubicada al norte de la Cuenca del Valle de México es un recurso muy importante para las comunidades cercanas y este uso ha derivado en problemas de contaminación, principalmente por la adición de materia orgánica causada por la entrada de aguas residuales. Dicho problema genera la necesidad de un estudio donde se determine la calidad de sus aguas. Los parámetros físicos, químicos y biológicos son los que permiten medir el grado de contaminación o calidad del agua (Aznar, 2000). Mientras que los índices de calidad del agua son dos o más parámetros que indican la salubridad y reflejan el comportamiento del ecosistema, teniendo como propósito simplificar en expresión numérica las características positivas o negativas, dando como resultado una estimación entre cero y uno o entre cero y cien, lo que define el grado de calidad de un determinado cuerpo lotico (Martínez de Bascaran, 1976; Bellinger *et al.*, 2010).

Uno de estos índices medible a partir de la capacidad que desarrollan los organismos para tolerar determinados niveles de contaminación es el índice de saprobiedad sistema propuesto por Kolwitz y Marsson en 1902, este utiliza datos ecológicos y fisicoquímicos para evaluar organismos con la capacidad de sobrevivir bajo condiciones de contaminación, con ello se puede representar objetivamente al sistema; es decir nos indica de manera resumida el impacto que tiene la contaminación en cada sitio mediante el estudio de organismos vivos (Salusso, 2002). Los sistemas lénticos mantienen una gran diversidad de organismos incluso de igual o mayor magnitud a los ecosistemas terrestres y la contaminación produce cambios en la estructura de las comunidades, la función biológica de los sistemas acuáticos y al propio organismo, afectando su ciclo de vida, crecimiento y su condición reproductiva (Salusso, 2002). Debido a esto, “algunos organismos pueden proporcionar información de cambios físicos y químicos en el agua, ya que a lo largo del tiempo revelan modificaciones en la composición de la comunidad (Laws, 1981)” (Vázquez *et al.*, 2006).

El uso de bioindicadores es una herramienta para conocer la calidad del agua, esto no quiere decir que cambie el método tradicional de los análisis fisicoquímicos. Pero simplifica en gran medida las actividades de campo y laboratorio, ya que su aplicación sólo requiere de la identificación y cuantificación de los organismos basándose en índices de diversidad ajustados con lo que se obtiene; la detección, la intensidad y la extensión de la contaminación en el cuerpo de agua mediante los organismos afectados (Rodier, 1990).

Objetivos

Evaluar la calidad del agua en la laguna Zumpango de Ocampo mediante la relación entre los componentes físicos, químicos y la parte biológica (fitoplancton), utilizando el índice de Saprobiedad como escala de medición.

Objetivos particulares

- Evaluar los parámetros físicos y químicos determinantes en la calidad del agua, en superficie y fondo mediante un análisis estadístico Univariado y Multivariado a fin de conocer el comportamiento del sistema.
- Evaluar el índice de Saprobiedad mediante el método de Pantle y Buck (1955), utilizando el fitoplancton como organismo bioindicador.
- Determinar el índice Shannon y Weiver de manera complementaria al índice de Saprobiedad, para la identificación de los géneros de fitoplancton así como la diversidad de especies.
- Comparar las variables físicas y químicas con las normas (NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-127-SSA1-1994 y CE-CCA-001/89) que establecen los criterios limitantes (mínimos y máximos) de calidad del agua y protección al ambiente.

METODOLOGÍA

Se realizó un muestreo mensual durante ocho meses en el año 2015 con un total de cinco estaciones de muestreo tomadas en superficie y fondo (Figura 1). Determinados por las actividades del lugar, así como entradas y salidas de corriente, los parámetros que no puedan ser determinados *in-situ* se realizan en laboratorio para lo cual se debe obtener muestras y dar el tratamiento requerido.

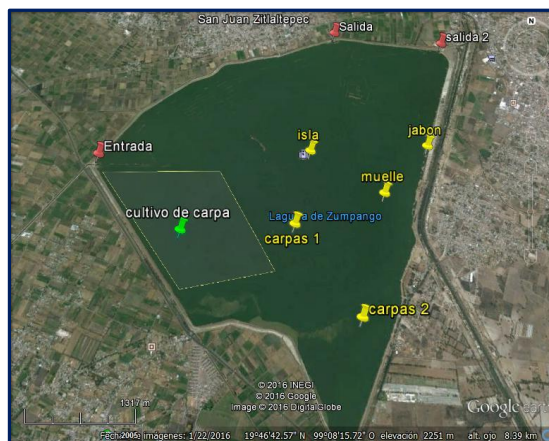


Figura 1. Laguna de Zumpango, puntos de muestreo, entrada y salida de agua, tomado de Google Earth.

En la tabla 1, se muestra los parámetros fisicoquímicos evaluados y los procedimientos utilizados en campo (mediciones que se pueden obtener *in situ*) y la tabla 2; muestra los parámetros y técnicas utilizadas, los cuales se realizaron en laboratorio y que complementan la evaluación fisicoquímica de calidad del agua.

Tabla 1. Técnicas utilizadas en campo.

Parámetro	Método	Descripción
Toma de muestras	Botella Van Dorn	Capacidad 2.2 L
Transparencia	Disco de Secchi	(Rodier, 1990)
Profundidad	Disco de Secchi	(Rodier, 1990)
Temperatura	Termómetro	(APHA, 1995)
Oxígeno disuelto	Oxímetro	Multiparámetro Hanna HI-9146 (APHA, 1995)
pH	Multiparámetro	Multiparámetro Hanna HI-83209 (APHA, 1995)
Conductividad eléctrica	Multiparámetro	Multiparámetro Hanna HI-83209 (APHA, 1995)

Tabla 2. Técnicas utilizadas en laboratorio.

Parámetro	Técnica
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Prueba de la DBO ₅ (APHA, 1995)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Reflujo cerrado, método colorimétrico (APHA, 1995)
Nitrógeno amoniacal(NH ₃ ⁺)	Método de la sal de fenol (APHA, 1995)

	Multiparámetro fotométrico Hanna HI-83200
Nitritos (NO_2^-)	Método del ácido-sulfanílico (MTBPAAA, 1984) Multiparámetro fotométrico Hanna HI-83200
Nitratos (NO_3^-)	Método del ácido fenol-disulfónico Multiparámetro fotométrico Hanna HI-83200
Orto-fosfatos	Método del fosfo-molibdato (MTBPAAA, 1984) Multiparámetro fotométrico Hanna HI-83200
Dióxido de carbono (CO_2)	Método volumétrico (APHA,1995)
Determinación de géneros fitoplanctónicos	Microscopio Invertido Olympus Lx70

Determinación de géneros fitoplanctónicos

La identificación y el recuento de los grupos fitoplanctónicos se llevó a cabo con un microscopio invertido (Olympus Lx 70; mediante el objetivo 40x), utilizando el método de acuerdo a la norma: CENTC230/WG2/TG3/N83 (documento de 11-05-2004); que a su vez, está basado en la técnica descrita por Utermöhl (1958). Se utiliza una cámara o cubeta de sedimentación: que consiste en una columna vertical de volumen variable que permite un mejor análisis, se utilizan guías de identificación, con las claves y descripciones existentes en las obras de Prescott, (1962); Ortega (1984; 1995); (Moreno *et al.*, 1996).

Trabajo de gabinete

- Recopilación bibliográfica.
- Cálculo de la diversidad (H') utilizando el índice de Shannon-Weaver (utilizado en Ecología para medir la biodiversidad específica).
- Determinación del índice de saprobiedad, propuesto por Kolwitz y Marsson (1955).

Análisis estadístico

Los datos cuantitativos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico mediante el programa Statgraphics Centurión XVI.II, dentro del cual se aplica una Prueba no Paramétrica Univariada de Comparación de Varias Muestras, prueba de Kruskal-Wallis y

Análisis Multivariado mediante Correlación de Pearson, Análisis de Componentes Principales y Análisis de Conglomerados (Cervantes, 1984; Cervantes *et al.*, 2006).

En la figura 15, se muestra el diagrama de trabajo utilizado, en forma resumida; en él se incluyen las tres fases de la metodología (trabajo de campo, trabajo de laboratorio y el trabajo de gabinete) y las actividades que se realizaron en cada una de ellas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados establecen que la laguna de Zumpango es somera y polimítica con una media de 1.99 m de profundidad, presenta una baja salinidad de 0.25 psu y una elevada alcalinidad causada por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, tiene un pE promedio de 8.68 lo que la ubica por encima de lo que establece la NOM-001-ECOL-1996, la transparencia tiene una media de 0.20 m, lo que se relaciona directamente con una elevada densidad de fitoplancton pero con una baja diversidad ($H' = 0.37$), su densidad determina la concentración (O_2) por lo que la laguna de Zumpango es oxidativa en superficie (7.31 mg L^{-1}), mientras en el fondo predominan de los procesos de reducción debido al agotamiento del O_2 . El análisis multivariado; indico, que este conjunto de nutrimentos es una de las variables más importantes, ya que describe el comportamiento del sistema debido a su relación directa con la materia orgánica y el fitoplancton. Además, se determinó mediante el análisis de conglomerados que el punto más contaminado debido a su actividad antropogénica fue Carpas I (Figura 3). Por tanto, se puede concluir que la laguna de Zumpango es un sistema contaminado (*Alfa-meso saprobio*), cuyo principal problema es la contaminación orgánica, que ocasiona exceso de nutrimentos y abundancia de fitoplancton, un problema derivado de la influencia antropogénica: debido a los residuos orgánicos e inorgánicos, pero principalmente a la entrada de las aguas municipales que llegan a la laguna a través del canal Santo Tomas; sin tratamiento alguno.

Análisis de fitoplancton

Se revisaron 72 muestras, en las cuales se encontraron 33 géneros clasificados en la siguiente forma: cuatro Divisiones, seis Clases, catorce Órdenes, dieciocho Familias. Las divisiones se encuentran representadas de la siguiente manera: Cyanophyta 34.28%, Chlorophyta 34.28%, Chrysophyta 28.57 y Euglenophyta 2.85% (Figura 40). Los géneros más representativos de la laguna de Zumpango (Anexo D), de acuerdo a su abundancia relativa, son los siguientes: *Phormidium* (0.9317), *Pseudanabaena* (0.0183), *Microcystis* (0.0107), *Rhabdoderma* (0.00561) y *Aphanocapsa* (0.0045).

Análisis de la diversidad de fitoplancton

El índice de Shannon y Weiver maneja un rango de 0.0 hasta 4.5 donde los valores cercanos a cero representan una baja diversidad y valores próximos a 4.5 una elevada diversidad, para este caso todos los sitios muestreados presentaron una baja diversidad con valores inferiores al 0.5 (Tabla 3), esto indica que existen pocas especies que dominan el sistema.

Tabla 3. Índice de Shannon-Weiver, por sitio de muestreo

Sitio de muestreo	Índice Shannon-Weiver H'	Género dominante (Cél/ml)	Clasificación del agua según Roldan (1992)
Muelle	0.4357*	<i>Phormidium</i> (348,574) Dominancia 0.86	Aguas contaminadas
Isla	0.4119*	<i>Phormidium</i> (343,701) Dominancia del 0.87	Aguas contaminadas
Carpas 1	0.4186*	<i>Phormidium</i> (340,813) Dominancia 0.87	Aguas contaminadas
Carpas 2	0.4190*	<i>Phormidium</i> (349,657) Dominancia 0.87	Aguas contaminadas
Jabón	0.4682*	<i>Phormidium</i> (344,874) Dominancia 0.85	Aguas contaminadas

*Valor índice Shannon-Weiver por Sitio de muestreo. Dónde: H': 0 < 1.5: Aguas contaminadas, de 1.5 a 3.0: Aguas moderadamente contaminadas, de 3 a 5: Aguas muy limpias, según Roldán, (1992).

Análisis del índice de Saprobiidad

El valor del índice de Saprobiidad para la laguna de Zumpango es de 3.37, el cual se ubica en el intervalo de 2.60 a 3.50 el cual establece una clasificación de acuerdo a Sládecek (1972) como *alfa-mesosaprobia*, los meses con mayor valor se registraron durante abril y noviembre con valores de 3.42 y 3.44 (Tabla 4).

Tabla 4. Valor del índice de Saprobiedad por mes de muestreo y clasificación de acuerdo a Sládecek (1972).

Mes de muestreo	Índice de Saprobiedad	Clasificación otorgada de acuerdo a Sládecek (1972)
Marzo	3.31	Aguas contaminadas
Abril	3.42	Aguas contaminadas
Mayo	3.41	Aguas contaminadas
Junio	3.34	Aguas contaminadas
Julio	3.32	Aguas contaminadas
Septiembre	3.35	Aguas contaminadas
Octubre	3.38	Aguas contaminadas
Noviembre	3.44	Aguas contaminadas

Análisis Multivariado

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales se utilizó para determinar cuáles son los parámetros que más influyen sobre el comportamiento del sistema; se realizó utilizando 17 variables, dentro de las cuales el componente uno obtuvo 38.59% y el componente dos 59.07% en porcentaje acumulado, como se observa en la tabla 5. El análisis indica que con los componentes uno y dos, pueden explicar el comportamiento de más de la mitad de las variables evaluadas.

Tabla 5. Componentes principales y porcentaje acumulado.

Número de Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	6.9471	38.59	38.595
2	3.6862	20.47	59.074
3	2.7532	15.29	74.370
4	1.5481	8.60	82.971

5	1.3177	7.32	90.291
6	1.0872	6.04	96.332
7	0.6603	3.66	100.000

Análisis Multivariado

Análisis de Componentes Principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales se utilizó para determinar cuáles son los parámetros que más influyen sobre el comportamiento del sistema; se realizó utilizando 17 variables, dentro de las cuales el componente uno obtuvo 38.59% y el componente dos 59.07% en porcentaje acumulado, como se observa en la tabla 6. El análisis indica que con los componentes uno y dos, pueden explicar el comportamiento de más de la mitad de las variables evaluadas.

Tabla 6. Componentes principales y porcentaje acumulado.

Número de Componente	Eigenvalor	Porcentaje de Varianza	Porcentaje Acumulado
1	6.9471	38.59	38.595
2	3.6862	20.47	59.074
3	2.7532	15.29	74.370
4	1.5481	8.60	82.971
5	1.3177	7.32	90.291
6	1.0872	6.04	96.332
7	0.6603	3.66	100.000

Las variables y las cargas de contribución por las que se encuentra representado el componente uno son los siguientes: profundidad (-0.3400); debido a que de ella depende la disponibilidad y redistribución de los nutrientes ya que al ser un sistema somero este

tiene mezclas constantes propiciadas por corrientes de viento y su temperatura cálida, además la concentración de los gases disueltos, principalmente el oxígeno que se ve afectado.

En la figura 2, se muestra gráficamente el comportamiento de las variables, el gráfico consta de cuatro cuadrantes numerados en contra de la manecilla del reloj (cuadrante I a cuadrante IV). Las variables se ordenan conforme a la relación que guardan entre sí y su magnitud determina el grado de importancia para ambos componentes.

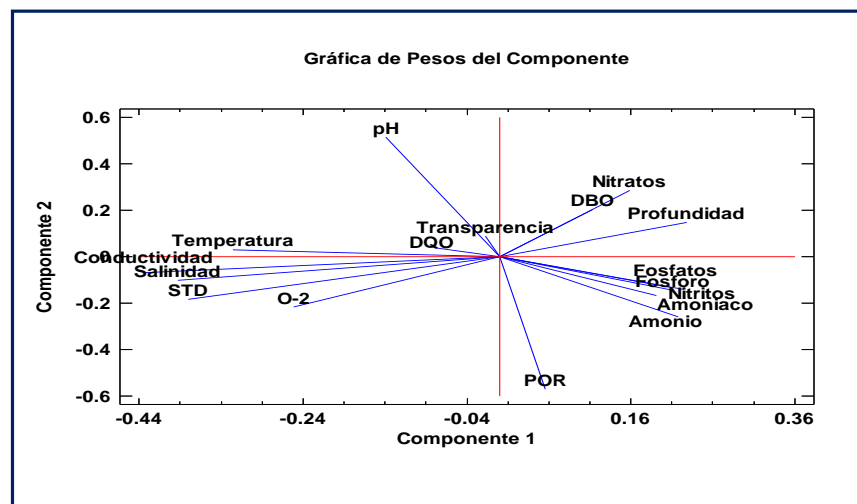


Figura 2. Análisis de Componentes Principales.

Análisis de conglomerados

Para este análisis se utilizaron 18 variables, que son los parámetros de evaluación: físicos químicos y biológicos. Todos evaluados en los nueve puntos de monitoreo de la laguna, con los valores de estos parámetros se formaron conglomerados entre los sitios de muestreo, esto a partir de la mayor cantidad de semejanzas entre el comportamiento de los parámetros.

La relación entre ellos se muestra en la figura 3, donde se establece cuáles son los sitios monitoreados que tienen un comportamiento semejante, otorgando un valor de relación el cual siendo más cercano a cero significa más variables con un comportamiento similar. El primer conglomerado está formado por: la isla-superficie y carpas I-superficie, ya que la distancia que marca su relación es menor a cinco, lo que indica que estos dos sitios tienen el comportamiento más similar; esto puede explicarse debido a que ambos sitios se ubican en la zona centro de la laguna. El segundo conglomerado es; Isla fondo, Carpas I fondo y

Carpas II fondo, lo que indica que el fondo de la laguna, en la zona centro tiene un comportamiento semejante a causa de la cercanía con el efluente principal de la laguna.

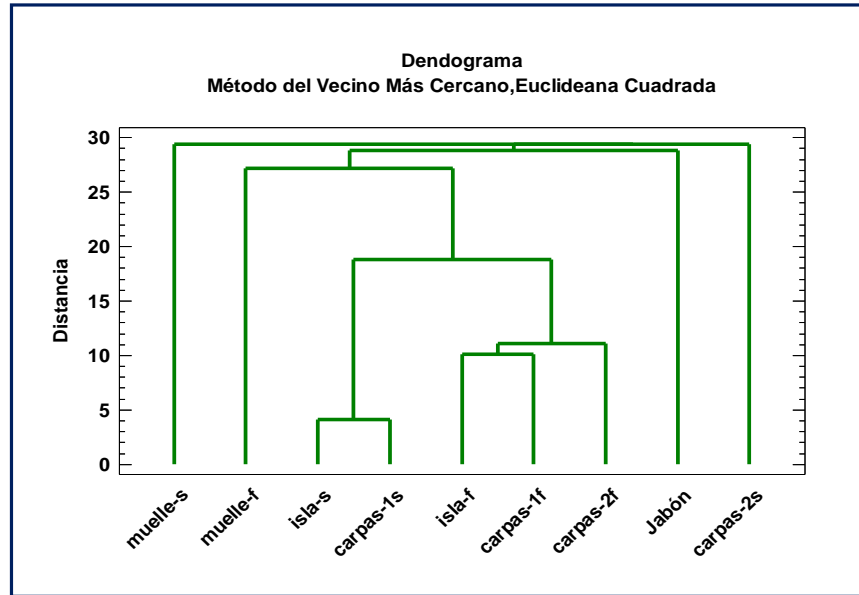


Figura 3. Análisis de Conglomerados.

CONCLUSIONES

La laguna Zumpango de Ocampo es un sistema somero polimíctico, compuesta de agua dulce, tiene una elevada alcalinidad por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, oxidativa en superficie y reductora en el fondo.

Las variables físicas y químicas que se encuentran fuera de los límites establecidos por la NOM-001-SEMARNAT-1996 son: DBO₅, DQO, pH y el O₂ y de acuerdo a los Criterios Ecológicos para la Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) son: Transparencia, pH, DBO₅, DQO, NO₃⁻ y NH₃.

Se encontró una elevada carga orgánica, lo que aumenta a disponibilidad de nutrientes; amonio, nitritos y fósforo que son la base de la *elevada densidad fitoplanctónica*, aunque con una baja diversidad ya que la dominancia del género *Phormidium* es ≥ 0.85 .

El análisis fitoplanctónico de diversidad y abundancia, así como los géneros identificados (*Phormidium*, *Euglena*, *Nitzschia*, *Microcystis*, *Navicula*, *Scenedesmus*) ubican a la Laguna de Zumpango como un *Sistema Mesotrófico*.

De acuerdo a los resultados del índice de saprobiedad, con un intervalo de 2.6 a 3.5 ubica a la laguna de Zumpango como *Alfa-mesosaprobia*, *calidad del agua III*. Mientras que el índice de diversidad de Shannon y Weaver (H') con valores de 0 a 1.5 clasifica al sistema como: *aguas contaminadas*.

Recomendaciones

Es necesario complementar este análisis con una evaluación de bacterias patógenas (coliformes totales, fecales y *Escherichia coli*) debido a que estos son organismos que causan enfermedades infecciosas en el ser humano.

Es recomendable realizar una evaluación de contaminantes inorgánicos (metales pesados), principalmente en tejidos de carpa (*Cyprinus carpio*) debido a que es la especie que se comercializa, ya que el último estudio realizado fue en 1998 por la FES Iztacala y en este se encontraron niveles peligrosos de níquel y plomo.

Por último, se recomienda considerar las técnicas de tratamiento de aguas residuales, (mediante organismos biológicos) principalmente en los efluentes que abastecen a la laguna de Zumpango ya que es la causa principal de la elevada carga orgánica

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WPCF, 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.U.S.A. (Métodos normalizados para el análisis del agua y aguas residual. 19ª. Edición. E.U.A).

Aznar Jiménez A. 2000 Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas. Revista interdisciplinaria de Gestión Ambiental, vol. 2(23). 12-20 pp.

Bellinger. E., Sigeo D. 2010.Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. Ed. Wiley. University of Manchester U.K, p. 284.

CE-CCA-001/89. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (*D.O.F. 2 Diciembre de 1989*).

Cervantes S. A, Marques D. S. M. J, Rivera G. P. (2006). Análisis Estadístico un Enfoque Practico con Statgraphics. Editor UNAM- FES Z, México D. F, p. 1213.

Cervantes, S. A. (1984). Manual de Técnicas Básicas para el análisis de Ambientes Acuáticos. Material Didáctico. LIB-4, Biología. ENEP-Zaragoza. UNAM, México, p. 106.

HANNA Instruments, 2008. Manual de Instrucciones MAN83200. Chicago, IL. USA. 131 pp.

Kolwitz, R., and M. Marson. (1902) Principios de la Evaluación Biológica de Agua después de su Flora y Fauna. Pp. 33- 72.

Lara V., Moreno R., Amaro M., 1996, Conceptos básicos y técnicas de laboratorio, Libros de texto, manuales de prácticas y antologías, Universidad Nacional autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México D.F, p. 224.

Martínez de Bascaran, G., 1976. “El índice de calidad del agua”, Ingeniería Química, pp. 45 – 49.

Moreno, J.L., S. Licea, y H. Santoyo, 1996. Diatomeas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, SEP-FOMES/PROMARCO. 273 pp.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Ortega M., 1984. Catálogo de algas continentales recientes en México. Universidad Nacional Autónoma de México, México, p. 566.

Ortega M.1995. Ficología de México algas Continentales. AGT Editor. México, D.F, p. 221.

Pantle. R. y Buck. H. 1955. Die Biologis Uberwachung der Gewasser und die Darstellung der Ergebnisse. Gas und Wasserfach. 96: 604.

Prescott, G. W. (1962). *Algae of the Western Great Lakes Area*. Revised Edition. Dubuque, Iowa. W.M.C. Brown Co. Pub. 977 pp.

Rodier, J. 1990. Análisis de aguas. Aguas naturales, aguas residuales y aguas de mar. Omega, Barcelona, p. 1025.

Salusso, M. M. & Moraña, L. B., 2002, 'Comparación de índices bióticos utilizados en el monitoreo de dos sistemas lóticos del noreste argentino', *Revista de Biología Tropical*, vol. 50, pp. 327-336.

Utermöhl, H., 1948. Zur Vervollkomnung der quantitativen Phytoplankton methodik. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 9: 1-38

Vázquez, S. G., Castro, M. G., Gonzáles, M. I., Pérez, R. R., Castro, B.T. (2006). Bioindicadores como herramienta para determinar la calidad del agua. *ContactoS*, 60(4) 41-48