



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRATAMIENTO DE AGUA DEL LAGO DE CHAPALA:  
EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

AMBIENTAL - AGUA

P R E S E N T A :

**OCTAVIO CERVANTES HERNÁNDEZ**



TUTOR:  
DRA. ANNE HANSEN HANSEN

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. de Victorica Almeida Jorge Luis

Secretario: Dra. Aguirre Saldivar Rina

Vocal: Dra. Hansen Hansen Anne

1<sup>er</sup>. Suplente: Dra. Ramírez Zamora Rosa María

2<sup>do</sup>. Suplente: M.I. Ramírez González Antonio

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MORELOS

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. ANNE HANSEN HANSEN

---

**FIRMA**

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



**Tratamiento de Agua del Lago de Chapala:**  
**Evaluación Técnica y Económica**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

PRESENTA:

ING. OCTAVIO CERVANTES HERNÁNDEZ

JIUTEPEC, MORELOS 2006

| UNAM

---

## DEDICATORIAS

A Dios, por haberme permitido llegar al término de una meta más en mi vida.

A mis padres Octavio y Angelina por brindarme todo su apoyo incondicional.

A mis hermanos Verónica y Mauricio, por ser mis mejores amigos.

A mis abuelos (†) por el ejemplo y principios que me han dado.

A Karla, Mariana, Alejandro, Fabiola, Ivonne, Olivia, Antonio y Felipe, por su valiosa amistad, sin ustedes no hubiera podido sobrevivir en Cuernavaca, muchas gracias los quiero mucho.

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no hubiera sido posible sin el apoyo económico que me otorgó el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de una beca de posgrado, para el estudio de maestría en Ingeniería Ambiental. Así como a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) de la Universidad Nacional Autónoma de México por la beca complementaria otorgada.

A la Dra. Anne Hansen Hansen por ser mi tutor principal durante el estudio de maestría y por su ayuda incondicional como directora de esta tesis y por haber confiado en mí, para la realización de este trabajo de investigación.

A los Drs. Manfred van Afferden, Rina Aguirre Saldivar y Jorge Luís de Victorica Almeida, por ser mis tutores de maestría, por sus comentarios y aportaciones para la realización y revisión de esta tesis.

También agradezco a los siguientes funcionarios por la información proporcionada para la realización de esta tesis:

Ing. José Gutiérrez Gómez, gerente de producción del Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Volúmenes anuales extraídos del Lago de Chapala para suministro urbano para la ciudad de Guadalajara.

Ing. Roberto Reynoso Quesada, departamento de potabilización del SIAPA. Costos anuales de tratamiento y eficiencias de tratamiento de las plantas potabilizadoras 1 y 2 de la ciudad de Guadalajara.

Ing. León Torres, jefe de distrito de riego 013 estado de Jalisco. Volúmenes mensuales extraídos del Lago de Chapala para uso agrícola e información sobre el distrito de riego.

Ing. Francisco Ramos García, subdelegado de pesca de SEMARNAT en Tizapán, Jalisco. Información sobre extracciones de agua en el lago para piscicultura.

Ing. Roberto Valenzuela Zepeda, gerente estatal CNA Michoacán. Volúmenes de agua subterránea y superficial de los municipios de Venustiano Carranza, Cojumatlán de Régules y Briseñas.

Ing. Arturo Arceo Villanueva, jefe de distrito de riego 024, Michoacán. Volúmenes mensuales extraídos del Lago de Chapala para riego agrícola y características del distrito de riego.

M. I. Ernesto Aguilar, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Volúmenes históricos diarios en el Lago de Chapala.

Ing. Omar Olivar Hernández, IMTA. Información general de los distritos de riego 013 y 024.

M.I. Antonio Ramírez González, IMTA. Información sobre características de las plantas de tratamiento de Guadalajara y precios unitarios de construcción para la estimación de costos de tratamiento.

Dra. Sofía E. Garridos Hoyos, IMTA. Asesorías y apoyo para la selección de los trenes de tratamiento para diferentes usos.

M.C. José Rodolfo Namuche Vargas, IMTA. Información y asesorías sobre salinización, rehabilitación y pérdida de suelos agrícolas por exceso de sales.

Ing. Fernando Pozo, IMTA. Apoyo y asesoría con el programa Capdet Works 2.0 para la estimación de costos de tratamiento.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.2 HIPÓTESIS.....	2
1.3 OBJETIVO.....	2
1.4 ANTECEDENTES.....	2
1.4.1 Descripción de la zona de estudio.....	2
1.4.2 Desarrollo económico de la región.....	5
1.4.3 Problemática.....	5
1.5 Normatividad.....	8
1.5.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.....	8
1.5.2 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.....	8
<b>2 USOS DE AGUA DEL LAGO DE CHAPALA.....</b>	<b>10</b>
2.1 Suministro urbano (volúmenes y localización).....	11
2.2 Riego agrícola (volúmenes y localización).....	13
2.3 Otros usos.....	18
<b>3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MONITOREO DEL AGUA EN EL LAGO DE CHAPALA.....</b>	<b>19</b>
3.1 Base de datos de la calidad del agua.....	19
3.2 Análisis y filtrado estadístico.....	20
3.3 Calidad del agua como función del volumen.....	22
<b>4 NECESIDADES DE TRATAMIENTO.....</b>	<b>29</b>
4.1 Calidad del agua y normatividad.....	29
4.2 Volúmenes mínimos del lago para satisfacer la calidad del agua.....	30
4.2.1 Suministro urbano.....	31

4.2.2	Uso agrícola.....	32
<b>5</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS.....</b>	<b>35</b>
5.1	Métodos de potabilización.....	35
5.2	Escenarios a evaluar.....	36
5.3	Capdet Works 2.0.....	38
5.4	Potabilización.....	42
5.4.1	Tratamiento existente.....	42
5.4.2	Tratamiento adicional.....	42
5.4.3	Evaluación de costos de potabilización (tratamiento actual).....	46
5.4.4	Evaluación de costos de potabilización (tratamiento adicional).....	51
5.5	Evaluación de costos de tratamiento para riego agrícola.....	53
5.5.1	Problemática .....	53
5.5.2	Valor económico del agua del Lago de Chapala para riego.....	53
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>57</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXO 1. Calidad del agua para diferentes usos.....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO 2. Calidad del agua como función del volumen del Lago de Chapala .....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO 3. Eficiencias de tratamiento de las plantas potabilizadoras 1 y 2 de la ciudad de Guadalajara para diferentes volúmenes del Lago de Chapala.....</b>	<b>74</b>

## RESUMEN

La cuenca Lerma – Chapala se localiza en la parte central de México y es ocupada parcialmente por cinco estados. La cuenca comprende el río Lerma y el Lago de Chapala. Con una longitud de más de 700 km, la cuenca tributaria cubre aproximadamente 54,000 km<sup>2</sup>. La cuenca cuenta con más de un tercio de la actividad económica del país, una quinta parte de todo el comercio y una octava parte de la agricultura de la nación; recibe 3% de la lluvia total del país, menos del 1% de la escorrentía y cuenta con 13% del total del agua subterránea (Leckie, 2001). El Lago de Chapala representa el destino final del agua descargada por la cuenca del río Lerma, donde el agua superficial y el suelo agrícola están siendo contaminados por descargas domésticas, industriales y de retorno agrícola. La profundidad promedio del lago varía entre 4 y 7 m, dependiendo de la época del año y de la precipitación anual. La acción del viento ayuda a reducir la estratificación y el lago está usualmente bien mezclado y oxidado en toda su profundidad. Éste es el cuerpo de agua natural más grande de México y es de gran importancia ecológica, social y económica para los estados de Jalisco (Leckie, 2001) y Michoacán.

Los volúmenes de agua en el Lago de Chapala varían anualmente debido a la extracción y utilización de agua del lago para diferentes sectores, principalmente urbano y de riego agrícola. También los fenómenos naturales como sequías, lluvias irregulares, cambio climático y evaporación en el vaso lacustre, influyen en las variaciones en el volumen del lago, ocasionando cambios en la calidad de agua. Por lo anterior y para contribuir en la valoración del Lago de Chapala, se propone identificar y evaluar las necesidades de tratamiento de agua y estimar los costos relacionados, para diferentes usos y volúmenes de agua en el lago.

Para identificar las necesidades de tratamiento se realizó un análisis estadístico de los datos de monitoreo de calidad de agua en el lago del periodo entre 1974 y 2001. Se determinó la relación que existe entre la concentración de los parámetros de calidad del agua y el volumen del lago, encontrándose que la calidad del agua disminuye cuando se reduce el volumen en el lago, y se determinaron las ecuaciones que permiten calcular la concentración de varios parámetros en función del volumen de agua. Con base en lo anterior, se determinaron los volúmenes de agua en el lago donde se sobrepasan las normas y criterios de calidad del agua.

Se analizó la variación de los volúmenes de extracción de agua para suministro urbano y uso agrícola para diferentes volúmenes de agua en el lago, así como la localización geográfica de los sitios de extracción. El agua del Lago de Chapala es utilizada para suministro urbano en la ciudad de Guadalajara y por los distritos de riego 013 y 024 para la agricultura; esta agua es extraída directamente del lago mediante 4 módulos de extracción. El volumen de agua extraída para Guadalajara no depende del volumen del lago, mientras que el volumen concesionado para riego agrícola, varía de acuerdo al volumen del agua en el lago.

Mediante el uso del programa Capdet Works 2.0, se determinaron los costos de tratamiento (obra civil, operación, mantenimiento, materiales, reactivos químicos y energía eléctrica).

Se evaluaron varios escenarios de tratamiento de agua para el Lago de Chapala; el primero consistió en el tratamiento convencional actual del agua para Guadalajara para volúmenes del Lago de Chapala de 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>; el segundo escenario incluyó un tratamiento avanzado (intercambio iónico), necesario para reducir las concentraciones de Sólidos Disueltos Totales, Alcalinidad, Fluoruro y Sodio a valores menores de la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) cuando el volumen del lago es menor a 1,800 Mm<sup>3</sup>. Adicionalmente, para cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2003), se evaluó el costo de tratamiento de lodos.

Con la finalidad de contribuir en la valoración del Lago de Chapala para diferentes volúmenes de agua, se realizó un análisis de costos de tratamiento de agua del lago para cumplir con los límites establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) para utilizar el agua para riego agrícola. Este análisis se realizó considerando un tratamiento convencional (cribado, coagulación – floculación, sedimentación, filtración y desinfección) seguido de un tratamiento avanzado (intercambio iónico) para la remoción de sólidos disueltos y el tratamiento de lodos.

Se demostró cuantitativamente que el costo de tratamiento unitario de agua tanto para suministro urbano como uso en riego agrícola aumenta al disminuir el volumen de agua en el lago.

## ABSTRACT

The Lerma-Chapala Basin is located in the central part of Mexico, and partly occupies five states. The watershed comprises the Lerma River and Lake Chapala. With a length of over 700 km, the tributary watershed covers approximately 54,000 km<sup>2</sup>. The basin accounts for more than one-third of the country's economic activity, one-fifth of all commerce and one-eighth of the nation's agricultural land. The watershed receives 3% of the country's total rainfall, less than 1% of the runoff, and accounts for 13% of the total groundwater (Leckie, 2001). Lake Chapala represents the final destination of most of pollution discharged to the Lerma river watershed, where surface water and agricultural land are being contaminated by domestic and industrial discharges. The average depth of the Lake Chapala varies between 4 and 7 m, depending on the season and the annual rainfall. Wind mixing helps reduce stratification, and the lake is usually well mixed and oxidized at all depths. Lake Chapala is the largest natural water body in Mexico and, as such is of major importance to both the ecologic and socio-economic systems of the states of Jalisco (Leckie, 2001) and Michoacan.

The volumes of water in the Lake of Chapala annually vary due to the extraction and water use of the lake for different sectors, mainly urban and from agricultural irrigation. Also the natural phenomena like droughts, irregular rains, climatic change and evaporation in the lake, influence in the variations in the volume of the lake, causing changes in the quality of water. By the previous thing and to contribute in the valuation of the Lake of Chapala, one sets out to identify and to evaluate the necessities of water treatment and to consider the related costs, for different uses and volumes from water in the lake.

In order to identify the treatment necessities a statistical analysis of the historical data of water quality was made in the lake of the period between 1974 and 2001. The relation was determined that exists between the concentration of the parameters of quality of the water and the volume of the lake, being that the quality of the water diminishes when the volume in the lake is reduced, and the equations were determined that allow to calculate the concentration of several parameters based on the volume of water. With base in the previous thing, the volumes of water in the lake were determined where the norms and criteria of quality of the water are exceeded.

The variation of the volumes of water extraction for urban provision and agricultural use for different volumes from water in the lake, as well as the geographic location of the extraction sites was analyzed. The water of the Lake of Chapala is used for urban provision in the city of Guadalajara and by the districts of irrigation 013 and 024 for agriculture; this water is extracted directly of the lake by means of 4 modules of extraction. The volume of water extracted for Guadalajara does not depend on the volume of the lake, whereas the volume assigned for agricultural irrigation, varies according to the volume of the water in the lake.

By means of the use of the program Capdet Works 2,0, the treatment costs were determined (construction, chemical reagents, operation, maintenance, materials, and electrical energy).

Several scenes of water treatment were evaluated for the Lake of Chapala; first it consisted of the present conventional treatment of the water for Guadalajara for volumes of the Lake of Chapala of 2.000, 3.000 and 4.000 Mm<sup>3</sup> the second scene included an advanced treatment (ion exchange), necessary to reduce the Total Dissolved Solid concentrations, Alkalinity, Fluoride and Sodium to smaller values of the NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) when the volume of the lake is smaller to 1.800 Mm<sup>3</sup>. Additionally, to fulfill the NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2003) the cost of sludge treatment was evaluated.

With the purpose of contributing in the valuation of the Lake of Chapala for different volumes from water, an analysis of costs of water treatment of the lake was made to fulfill the limits established in the Ecological Criteria of Quality of Water EC-CCA-001/89 (DOF, 1989) to use the water for agricultural irrigation. This analysis was made considering a conventional treatment (screening, coagulation - flocculation, sedimentation, filtration and disinfection) followed of an advanced treatment (ion exchange) for the dissolved solid removal and sludge treatment.

The cost of unitary water treatment was demonstrated quantitatively as much that for urban provision as use in agricultural irrigation increases when diminishing the volume of water in the lake.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Lago de Chapala es el lago mexicano de mayor dimensión, es un lago tropical somero y turbio, representa un ecosistema único y es el destino final del agua capturada en la cuenca del río Lerma. La disminución de los volúmenes de agua del Lago de Chapala, es causado por las fluctuaciones hidrometeorológicas y por la sobreexplotación del recurso aguas arriba de la cuenca. Es claro que algo tiene que hacerse para preservar el Lago de Chapala, el cual genera significantes ingresos económicos con el turismo, genera industria pesquera, abastece a más de dos millones de habitantes de Guadalajara con agua para suministro urbano y tiene un elevado valor simbólico como el lago más grande de México (Hansen y Afferden, 2001).

Las variaciones de volúmenes de agua en el lago, ocasionan cambios en la calidad del agua, que es importante cuantificar como función del volumen del lago y con ello, identificar y evaluar las necesidades de tratamiento y estimar los costos relacionados, para diferentes usos y volúmenes de agua en el lago. Esta información será útil para tomar decisiones sustentables para preservar este importante lago.

En esta tesis se pretende establecer un valor económico para el tratamiento al agua del Lago de Chapala para diferentes usos, dependientemente de los volúmenes de agua en el lago. Esta valoración incluye los costos ambientales que se generan por las variaciones de agua en el lago y será incluida en el proyecto donde se originó esta tesis denominado: “El Lago de Chapala y su entorno eco-social. Desarrollo de una matriz de costos ecológicos para el análisis de políticas ambientales” (SEMARNAT-2002-C01-0087).

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

Los volúmenes de agua en el Lago de Chapala varían a través del tiempo, debido a la extracción y utilización de agua del lago para diferentes sectores, como suministro urbano y riego agrícola, así como a factores naturales como sequías, lluvias irregulares, cambio climático y evaporación en el vaso lacustre.

## 1.2 HIPÓTESIS

Los costos de tratamiento de agua para diferentes usos aumentan cuando disminuye el volumen de agua en el lago.

## 1.3 OBJETIVO

Determinar las necesidades de tratamiento de agua del Lago de Chapala para diferentes usos, así como estimar los costos de tratamiento para estos usos y para diferentes volúmenes de agua en el lago.

## 1.4 ANTECEDENTES

Esta tesis forma parte de un proyecto SEMARNAT - CONACYT (2003), cuyo título es “El Lago de Chapala y su entorno eco-social” (SEMARNAT-2002-C01-0087). El objetivo general de este proyecto es elaborar una matriz de costos ecológicos, para utilizarla como herramienta que permita analizar el impacto económico debido a la modificación de servicios ambientales, derivado de la variación de volúmenes de agua del Lago de Chapala y establecer con cierto grado de confianza los resultados ambientales. Algunos traducidos en términos monetarios, del cambio de los volúmenes del Lago de Chapala debido a la modificación del comportamiento en el consumo de agua de varios de los sectores involucrados como: industria, agricultura, público, social, turismo, suelo, bosque, microfauna del lago, por mencionar algunos.

### 1.4.1 Descripción de la zona de estudio

El Lago de Chapala es el lago natural más grande de México, el segundo en altitud en América, el tercero en tamaño en América Latina y ocupa el número 68 a escala mundial.

Forma parte de la cuenca Lerma - Chapala - Santiago, la más extensa de México y cuya importancia radica en las actividades económicas, sociales y turísticas (SEMARNAT, 2003).

El Lago de Chapala se encuentra entre los estados de Jalisco y Michoacán; en el oriente de Jalisco con 90% de su superficie y en el noroeste de Michoacán con el 10% de la superficie, aunque esta proporción varía por la pérdida de superficie del vaso lacustre. Se encuentra dentro de los paralelos 20° 07' y 20° 21' de latitud norte y los meridianos 103° 40' 45" y 104° 25' 30" (figura 1.1) de longitud oeste y a una altitud de 1,524 msnm (SEMARNAT, 2003).

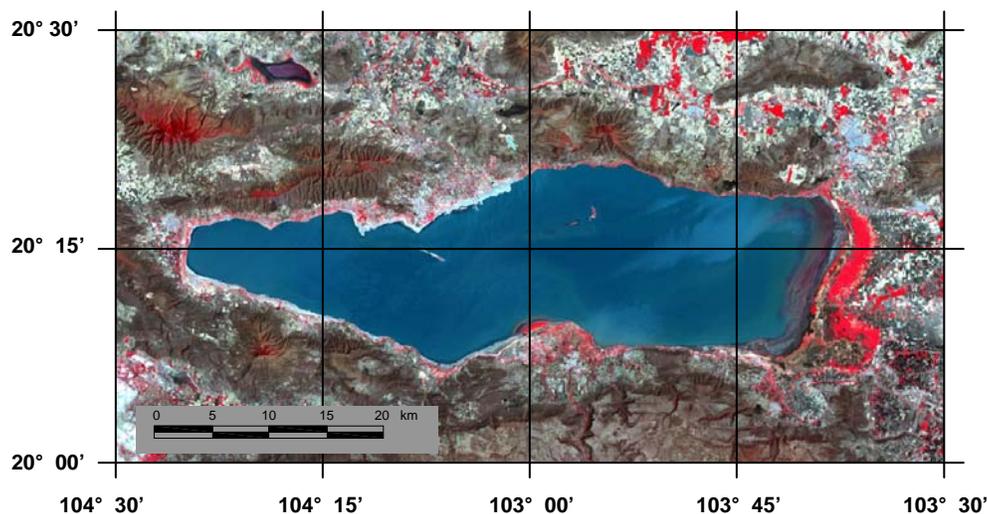


Figura 1.1 Vista aérea del Lago de Chapala. Imagen tomada del satélite Landsat (NASA, 2003).

#### 1.4.1.1 Características

La superficie histórica promedio del lago ha sido de 1,053 km<sup>2</sup> de 1934 a 2003. Tiene una longitud máxima de 82 km y 19 km de ancho, con una profundidad máxima de 8.35 m y una media de 4.86 m (tabla 1.1), aunque en los últimos tiempos, la escasa aportación que recibe de sus afluentes y la precipitación pluvial ha abatido su profundidad promedio hasta 4 m (SEMARNAT, 2003). El lago se abasteció durante muchos años en un 50% de las aguas del río Lerma. Actualmente, las aportaciones de

este río representan el 10%. Cuando se ha medido a su mayor capacidad, alcanza 9,686 Mm<sup>3</sup> de agua, pero en sus momentos críticos, ha reducido su volumen de almacenamiento hasta 953 Mm<sup>3</sup>. En la figura 1.2 se muestra la comparativa de volúmenes en el lago para diferentes años.

Tabla 1.1 Principales características hidrológicas del Lago de Chapala (CNA-IMTA, 2000 y Aguilar, 2005)

Valor	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Profundidad Media [m <sup>3</sup> ]	Área Superficial [km <sup>2</sup> ]	Periodos y Fechas
Mínimo	953	1.42	670.09	Julio, 1955
Máximo	9,686	8.33	1,160.71	Octubre, 1935
Promedio	5,106	4.86	1,053.54	Marzo, 1934 - Marzo, 2005



Figura 1.2 Comparativas fotográficas de volúmenes de agua en el lago en los años de 1976, 2002, 2003 y 2004.

#### 1.4.1.2 Clima

El clima de la región es semiseco con invierno y primavera secos y semicálido sin estación invernal definida. La temperatura media anual es 19.9 °C, la máxima 30 °C y la mínima 9 °C, presentándose en los meses de julio y enero respectivamente. El promedio de días con heladas al año es de 4.1. La frecuencia anual de granizadas es menor de dos días. La precipitación media anual en el lago es 740 mm, con régimen de lluvias en los meses de junio, julio y agosto. El mes más lluvioso es julio y el más seco enero. La evaporación promedio anual es de 1,912 mm, siendo mayor durante abril y mayo (2,500 mm) y el mes en que es menor es diciembre (100 mm). La dirección dominante de los vientos es de este a oeste y la velocidad máxima es 12 km/h (SEMARNAT, 2003).

## 1.4.2 Desarrollo económico de la región

Se caracteriza por importantes desarrollos agrícolas e industriales, e intensa actividad agrocomercial y turística. El fenómeno de migración hacia las grandes ciudades del país o para los campos agrícolas norteamericanos es evidente en la región. Las inversiones se han centrado en dos regiones: por una parte, el distrito de riego 024 formado por la desecación de 50,000 ha en tiempos de Porfirio Díaz, que convirtió a la zona comprendida entre La Barca, Jalisco y Sahuayo, Michoacán, en una desarrollada región agrícola orientada originalmente a la producción de granos básicos y posteriormente al sorgo, cártamo y garbanzo. Otra zona de desarrollo regional es el corredor industrial El Salto - Ocotlán - La Barca, que fue impulsado por el gobierno del estado de Jalisco desde la década de los 70, pero que desde los 30 y 40, con la ubicación de industrias como Nestlé y Celanese, ya había adquirido un impulso importante (SEMARNAT, 2003).

## 1.4.3 Problemática

Los principales problemas que se presentan en el lago se resumen a continuación (SEMARNAT, 2003):

1. Variación de volúmenes en el lago.
2. Azolve.
3. Contaminación.

### 1.4.3.1 Variación de volúmenes en el lago

En los últimos años, el lago ha recibido un volumen menor a su extracción, condición que se traduce en un déficit anual entre 500 y 600 Mm<sup>3</sup> (Aparicio, 2001). La desecación o pérdida de la superficie lacustre es debida a la insuficiencia de aportes respecto del volumen extraído y evaporado.

En la figura 1.3 aparecen claramente los cambios que el lago ha sufrido de 1986 a 2001. El lago de Chapala ocupaba, en marzo de 1986 una superficie de 1,048 km<sup>2</sup>; quince años más tarde en marzo de 2001 esa superficie se había reducido a 812 km<sup>2</sup>. Esta pérdida de casi 24,000 ha de superficie corresponde, con base en estudios batimétricos, a un descenso de entre 2 a 4 m en el nivel de lago, hasta un nivel no observado desde

la prolongada sequía de mediados de los años cincuenta, es decir con agua a sólo una cuarta parte de su capacidad (SEMARNAT, 2003).

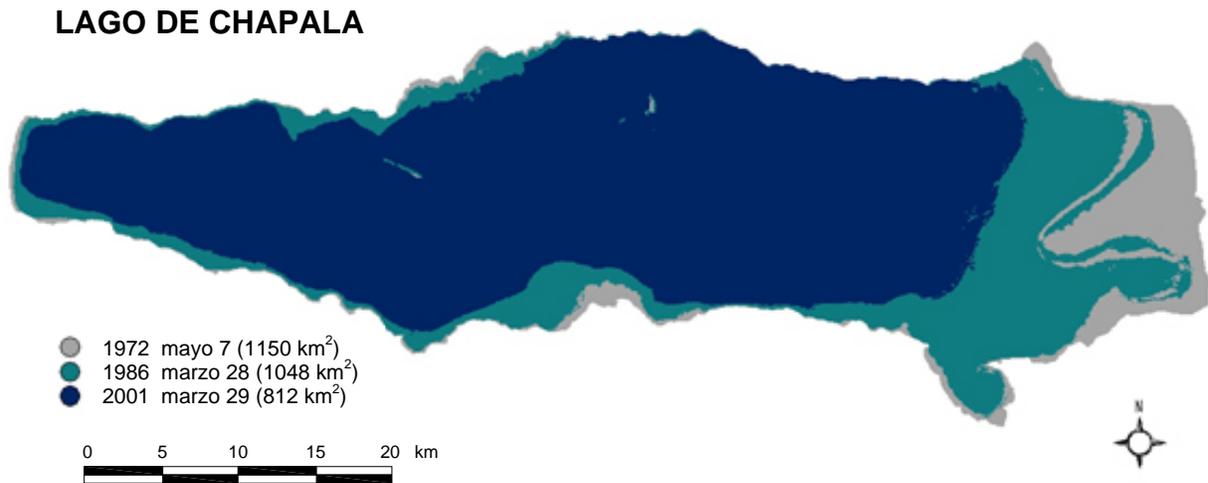


Figura 1.3 Superficie del Lago de Chapala en los años 1972, 1986 y 2001.

#### 1.4.3.2 Azolve

Respecto al azolve, la situación del lago se puede documentar de esta forma: de 1930 a 1977 han entrado al lago 78 Mm<sup>3</sup> de sedimentos por el río Lerma, ocasionado por diversos factores, entre otros, la deforestación a lo largo de la cuenca, el deslave y la erosión. De no modificarse esta tendencia, en un milenio el lago llegaría a su azolve total. Se calcula que anualmente el lago recibe 930,000 t de sólidos y éstos van en aumento en los últimos años; de 300 mg/L que recibía en 1972, hacia 1984 los sólidos aumentaron a 500 mg/L. Las causas de este aumento de concentración, se atribuyen a la reducción en el volumen almacenado de agua, así como a la disminución de salidas por el río Santiago desde 1981.

Los cambios en el uso del suelo a lo largo del Lerma también contribuyen a que este cuerpo de agua reciba un mayor volumen de sedimentos. Los procesos de deforestación propiciados por prácticas agrícolas tradicionales contribuyen también al azolve del lago (SEMARNAT, 2003).

En este sentido hay posiciones encontradas: hay quienes afirman que la tendencia natural de todos los lagos es a desaparecer y hay quienes consideran necesario tomar acciones para evitar este azolve; sin embargo es muy claro en el caso de Chapala que el azolve que experimenta tiene un importante componente antropogénico, esto es, el proceso está potenciado por las actividades humanas. Asimismo, el agua de lago era cristalina, pero actualmente su transparencia (disco Sechi) rara vez excede los 30 cm (SEMARNAT, 2003).

### 1.4.3.3 Contaminación

El lago de Chapala está siendo contaminado por las descargas de ciudades, industrias y la agricultura. Aunque grandes esfuerzos se han hecho para incrementar el número y la capacidad de plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca y en la ribera del lago, hoy grandes volúmenes de efluentes son todavía descargados sin ningún tratamiento previo. Concentraciones de metales pesados determinados en muestras de agua del Lago de Chapala han llegado a límites de la NOM-127-SSA1-1994 de agua para uso y consumo humano. Esta situación puede empeorar cuando los volúmenes de agua disminuyan y los contaminantes se acumulen. Existen datos de contaminantes tóxicos en muestras de sedimentos del río y lago, que exceden, en por lo menos un parámetro, del valor de Severo Efecto Ecotoxicológico (SEL) que adoptó el gobierno canadiense para sedimentos altamente contaminantes, indicando esto la afectación por descargas industriales, municipales y/o agrícolas (Hansen y Afferden, 2001).

La concentración existente de nutrientes en el lago genera eutroficación asociada por el crecimiento de vegetación acuática flotante. Recientemente, han florecido algas verde-azules que podrían causar problemas de sabor y olor en agua para abastecimiento urbano y afectar la sanidad del ecosistema. Otro problema ecológico es la sobreexplotación de la pesca, que está intensificada por la baja productividad del sistema que está causado por la disminución de la cantidad y calidad del agua. Los pocos datos de metales pesados en peces, indican que las concentraciones no han excedido los límites de toxicidad aguda, pero señala la necesidad de evaluar los riesgos para la salud humana asociados con el consumo de pescado (Hansen y Afferden, 2001).

## 1.5 Normatividad

En México existen normas y criterios ecológicos que regulan los parámetros de calidad de agua para diferentes usos como son: uso público urbano, riego agrícola, pecuario, recreativo y protección de vida acuática. Estas normas y criterios ecológicos son importantes porque especifican los límites máximos permisibles que debe tener el agua para utilizarla en las diferentes actividades, y disminuir el riesgo de contraer enfermedades en los humanos, así como para preservar la flora y fauna.

### 1.5.1 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

"SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACIÓN" (DOF, 2000).

La Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados en todo el territorio nacional. El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual esta norma establece límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

### 1.5.2 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89

Elaborado por SEMARNAP, Comisión Nacional del Agua (CNA), con base en: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, (DOF, 1989).

Estos Criterios Ecológicos especifican la calidad del agua para los usos siguientes: público urbano, riego agrícola, pecuario, recreativo y protección de vida acuática. En estos criterios se exponen los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos como son color, olor o sabor, potencial de hidrógeno y sus niveles permisibles, las autoridades competentes podrán calificar a los cuerpos de agua, como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua

potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, uso pecuario, uso en la acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Dichos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados.

En el Anexo 1 se presentan los parámetros para la calidad de agua para diferentes usos, incluyendo parámetros inorgánicos, orgánicos, físicos y biológicos. Se indican los límites máximos permisibles para la calidad del agua según los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua y se comparan con los parámetros que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

Estos criterios de calidad del agua, se utilizaron para determinar las necesidades de tratamiento para diferentes usos en el Lago de Chapala.

## 2 USOS DE AGUA DEL LAGO DE CHAPALA

El agua del Lago de Chapala tiene un uso económico para riego agrícola e industria, y es de gran valor ecológico por la diversidad de especies que lo habitan y además por ser utilizado para suministro urbano para los habitantes de Guadalajara; los consumidores de agua se muestran a continuación (figura 2.1).

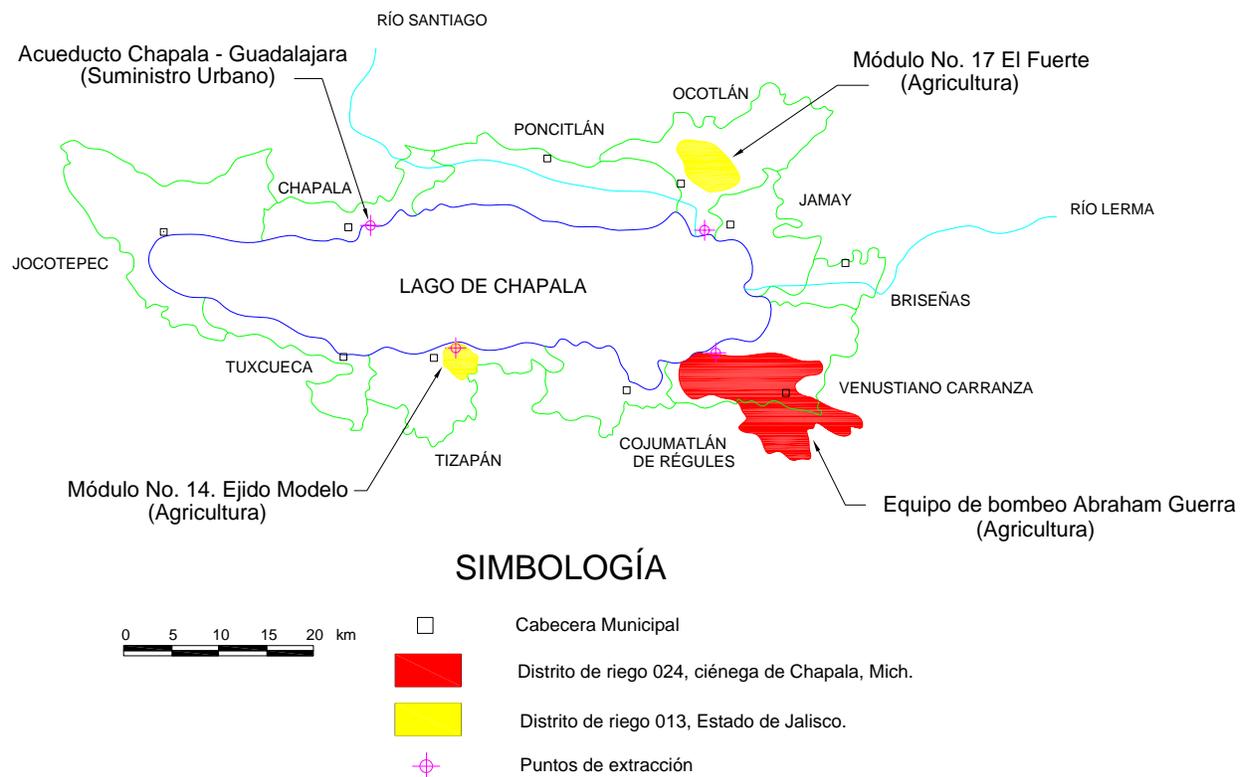


Figura 2.1 Consumidores de agua del Lago de Chapala.

De acuerdo con la información de los organismos operadores del estado de Jalisco y Michoacán (CNA Michoacán, distritos de riego 024 y 013, SIAPA, CEAS y SEMARNAT) y realizando un recorrido por toda la ribera del lago, se pudo determinar que las únicas extracciones directas de agua en el Lago de Chapala son para la ciudad de Guadalajara y para los distritos 024 y 013 para riego agrícola. En la figura anterior se observa la localización de los puntos de extracción de agua en el lago y la superficie de los distritos donde se riega con agua del lago.

## 2.1 Suministro urbano (volúmenes y localización)

La única extracción de agua en el lago para suministro urbano es el agua que se bombea para la zona metropolitana de Guadalajara; los municipios ribereños utilizan agua subterránea para satisfacer sus necesidades (CEAS, 2004; CNA Michoacán, 2004). El gobierno federal en coordinación con el Gobierno del Estado de Jalisco, construyeron el acueducto Chapala – Guadalajara con el objetivo de abastecer con mayor eficiencia de agua potable a la zona metropolitana de Guadalajara en beneficio de sus habitantes. Este sistema hidráulico que consiste en planta de bombeo y línea de conducción, pertenece a la Comisión Nacional del Agua (CNA), es operada por el Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) y fue inaugurada en enero de 1992 y algunos datos de proyecto son los siguientes (SIAPA, 2004):

- Gasto máximo: 7.5 m<sup>3</sup>/s.
- Planta de bombeo: 5 equipos de 1.5 m<sup>3</sup>/s cada uno.
- Altura de bombeo: 138 m.
- Longitud de acueducto: 42.5 km.
- Diámetro de la tubería: 2.10 m.
- Capacidad del tanque de entrega: 35,000 m<sup>3</sup>.

El agua para la ciudad de Guadalajara se extrae 5 km al oriente de la población de Chapala, municipio del mismo nombre (figura 2.2).

El acueducto tiene su inicio dentro del Lago de Chapala, mediante un canal de llamada de 1,300 m de longitud, de los cuales 300 m están dentro del lago y 1,000 en tierra firme. Este canal dispone primeramente de una estructura de retención de lirio y al llegar a la planta de bombeo, tiene una transición; la planta, antes del cárcamo de bombeo, cuenta con una rejilla para la retención de las plantas que pudieran crecer en el canal. Antes de la casa de máquinas, la planta se dotó de una estructura de concreto, donde se apoya la rejilla metálica que evitará el paso de sólidos mayores a 2" de diámetro. El agua es extraída del lago por medio de cinco equipos de bombeo, es conducida por un acueducto

de acero y concreto preesforzado con una longitud de 42.5 km a las plantas potabilizadoras No.1 y 2 ubicadas en la falda del cerro del Cuatro. De este sistema se obtiene el 65 por ciento del agua que se consume en la ciudad, transportando 7,500 lps.



Figura 2.2 Localización del acueducto Chapala – Guadalajara, extracción de agua para suministro urbano.

A continuación se presentan en la tabla 2.1 los volúmenes anuales extraídos del lago para la zona metropolitana de Guadalajara del periodo de 1988 a 2003 (SIAPA, 2004):

Tabla 2.1 Volúmenes extraídos del lago para Guadalajara.

Año	Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Volumen extraído [M <sup>a</sup> ]	Año	Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Volumen extraído [Mm <sup>3</sup> ]
1988	3856	236.03	1996	3881	183.65
1989	3233	241.80	1997	3260	188.09
1990	2501	209.97	1998	2654	194.26
1991	3051	189.97	1999	2678	188.58
1992	4665	183.25	2000	2088	181.37
1993	5051	194.23	2001	1542	164.75
1994	4759	178.90	2002	1549	164.05
1995	4252	179.87	2003	2063	155.50

Los volúmenes anuales fueron graficados contra el volumen medio anual del Lago de Chapala, para determinar si existe una relación del volumen de extracción con el volumen del lago (figura 2.3).

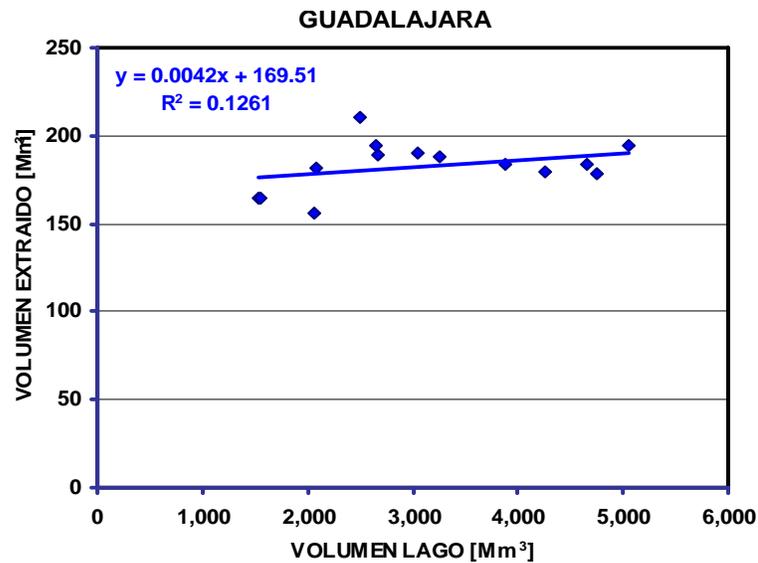


Figura 2.3 Volumen extraído para suministro urbano contra volumen del lago.

Las extracciones anuales fueron ajustadas a una línea de regresión, obteniendo su ecuación y el coeficiente de correlación. Se observa en los últimos 15 años que la tendencia de las extracciones de agua no dependen del volumen del lago. Esta extracción depende de la demandan de agua para la ciudad de Guadalajara y de la capacidad de tratamiento de las plantas potabilizadoras existentes.

## 2.2 Riego agrícola (volúmenes y localización)

Las extracciones de agua para uso agrícola son para los distritos de riego 024 (módulo La Palma) y los módulos Ejido Modelo y El fuerte del 013, a continuación se presentan la localización de las extracciones para bombeo y volúmenes extraídos por los mismos.

### 1. Distrito de riego No. 024, Ciénega de Chapala, Michoacán. Equipo de bombeo Abraham Guerra (La Palma).

Esta estación de bombeo se localiza en la comunidad La Palma, en el municipio de Venustiano Carranza, Michoacán (figura 2.4).

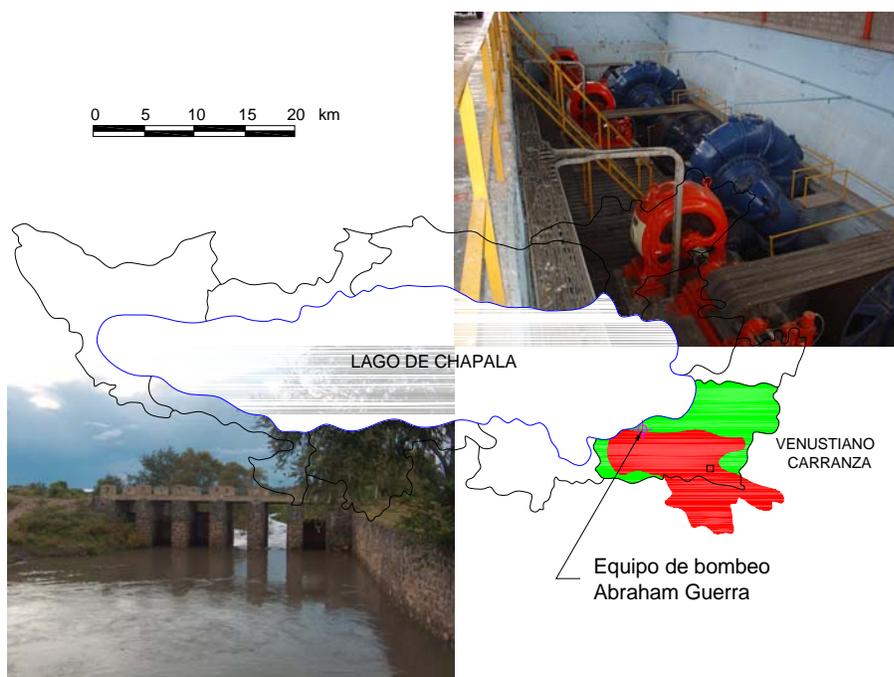


Figura 2.4 Localización equipo de bombeo Abraham Guerra, extracción de agua para agricultura.

## 2. Distrito de riego 013, Estado de Jalisco. Módulo Ejido Modelo.

La estación de bombeo se localiza en la localidad Ejido Modelo Emiliano Zapata en el municipio de Tizapán El Alto, Jalisco (figura 2.5).

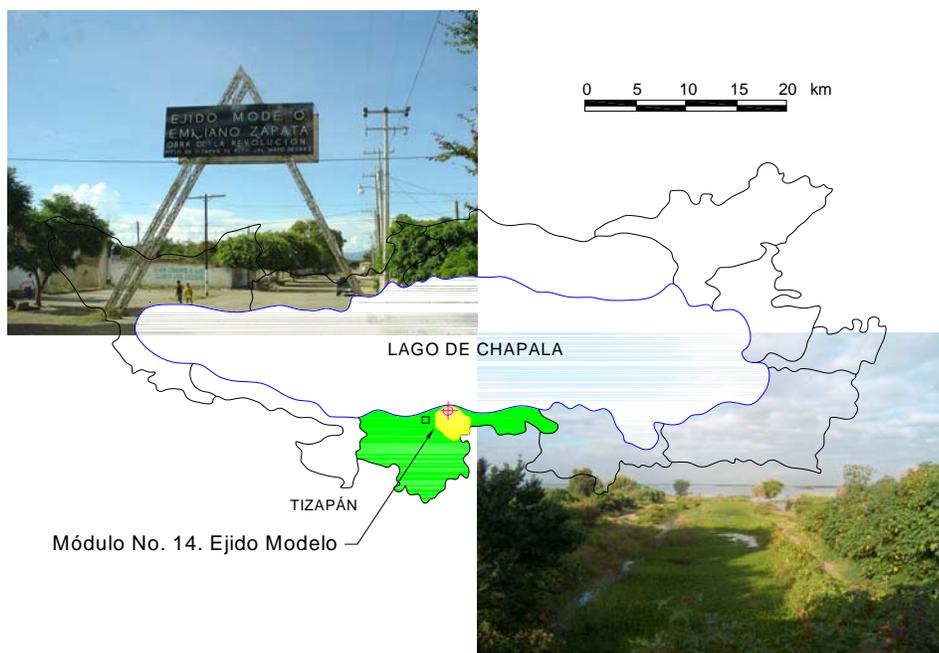


Figura 2.5 Localización módulo Ejido Modelo, extracción de agua para agricultura.

### 3. Distrito de riego 013, Estado de Jalisco. Módulo Ejido El Fuerte.

La ubicación de esta estación de bombeo es en la localidad El Fuerte, municipio Ocotlán, Jalisco (figura 2.6).

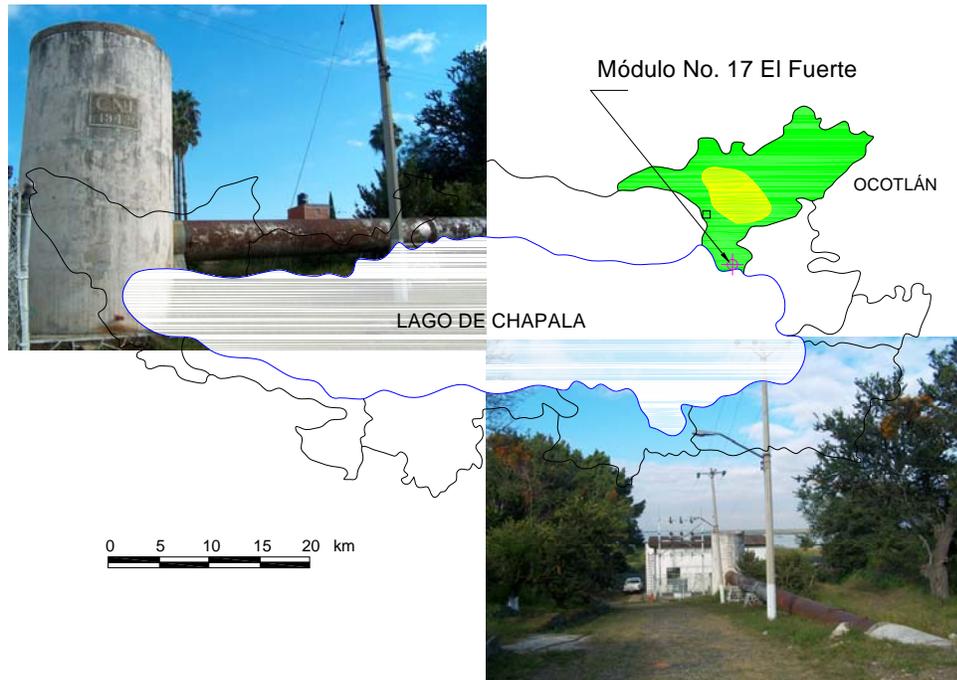


Figura 2.6 Localización módulo El Fuerte, extracción de agua para agricultura.

A continuación se presentan los volúmenes extraídos para cada módulo (CNA, 2004).

Tabla 2.2 Volúmenes extraídos del lago para riego agrícola.

Año	Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Volumen extraído [Mm <sup>3</sup> ]		
		Distrito de riego 024		Distrito de riego 013
		La Palma	Modelo	EL Fuerte
1996	3,881	39.94	0.79	5.67
1997	3,260	34.61	0.70	9.06
1998	2,654	16.74	0.72	4.78
1999	2,678	0.00	0.37	2.06
2000	2,088	0.00	0.04	0.00
2001	1,542	0.00	0.00	0.00
2002	1,549	0.00	0.00	0.00
2003	2,063	0.00	0.00	0.00
2004	4,081	18.64	0.00	4.35

Los volúmenes anuales para riego agrícola se graficaron contra su correspondiente volumen del lago obteniendo los siguientes resultados (figuras 2.7, 2.8 y 2.9)

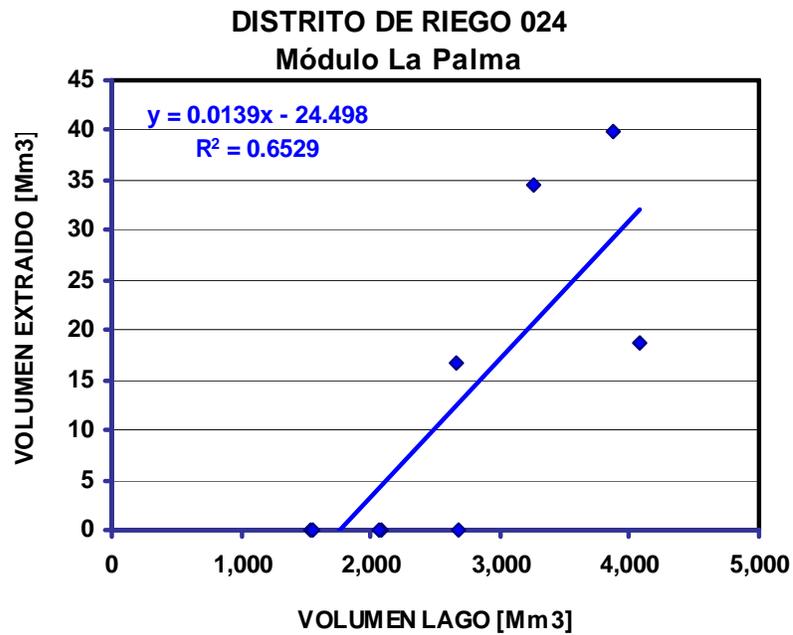


Figura 2.7 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 024) contra volumen del lago.

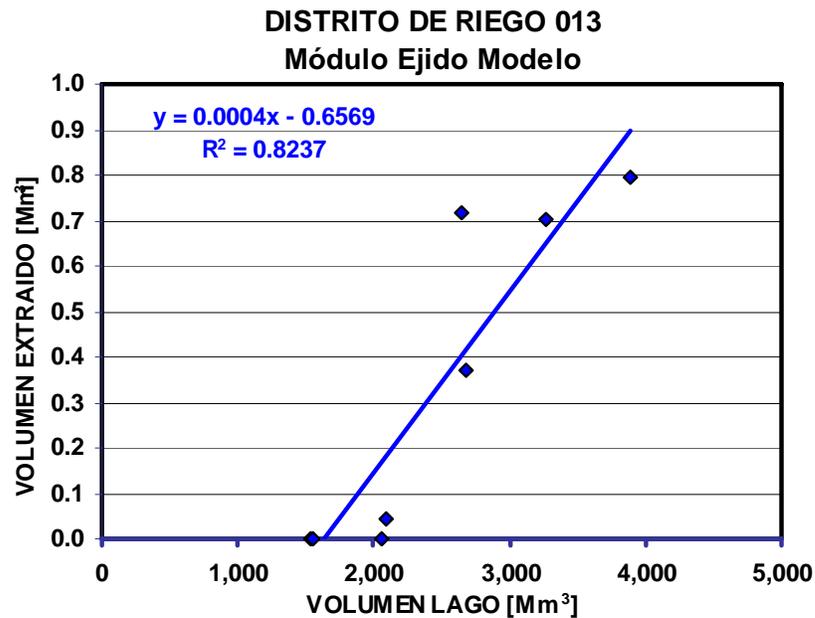


Figura 2.8 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 013, módulo Ejido Modelo) contra volumen del lago.

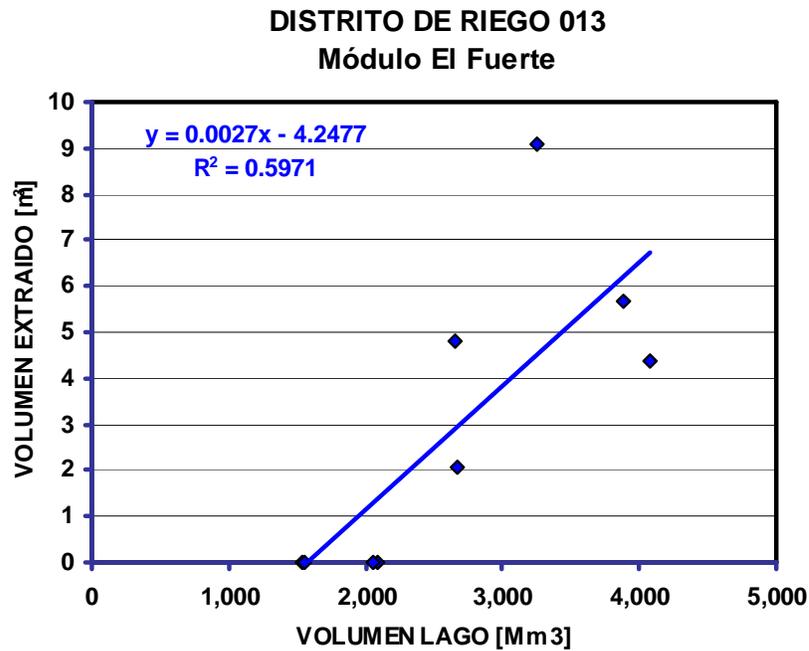


Figura 2.9 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 013, módulo El Fuerte) contra volumen del lago.

Se observa en las figuras anteriores que la extracción de agua para agricultura varía linealmente dependiendo del volumen de agua en el lago. Este volumen de extracción es otorgado por el Consejo de Cuenca y es directamente proporcional al volumen del lago.

Un cuestionario fue aplicado a los jefes de los distritos de riego visitados, con la finalidad de conocer algunas características de las estaciones de bombeo y del distrito de riego, así como conocer la problemática que existe con el agua de riego en cuanto a su calidad.

Este cuestionario fue aplicado en septiembre del 2004 y contestado por el Ing. Arturo Arceo Villanueva jefe del distrito de riego 024 y por parte del distrito de riego 013 el Ing. Manuel González León. El cuestionario aplicado así como la información proporcionada por los distritos de riego se presentan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Información proporcionada por los distritos de riego.

Preguntas		Respuestas		
		DR 024	DR 013	
		La Palma	Modelo	El Fuerte
1	¿Antigüedad de la estación de bombeo?	1920	1962	1942
2	¿Número de bombas y capacidad?	3 bombas, 4 m <sup>3</sup> /s	1 bomba, 1 m <sup>3</sup> /s	2 bomba, 1 m <sup>3</sup> /s
3	¿Superficie total del distrito de riego?	46,466 ha	53,943 ha	53,943 ha
4	¿Superficie regada con agua del Lago de Chapala?	12,000 ha	150 ha	1,392 ha
5	¿Tipos de cultivo?	Trigo, cártamo, forrajes, cebolla, maíz, sorgo y alfalfa	Cebolla, ejote, pepino, maíz, calabaza, tomate y chile.	Trigo, garbanzo, alfalfa, maíz y sorgo.
6	¿Tienen problemas con la calidad del agua para diferentes cultivos?	Para la mayoría no pero para hortalizas si.	Para la mayoría no pero para hortalizas si.	Para la mayoría no pero para hortalizas si.
7	¿Han observado mejoría en la calidad del agua para riego al aumentar el volumen del lago?	Si cuando el volumen es superior a 4,000 Mm <sup>3</sup> se pueden cultivar hortalizas	Si, la calidad del lago mejora cuando aumenta el volumen de agua en el lago	Si, la calidad del lago mejora cuando aumenta el volumen de agua en el lago
8	¿De qué depende la cantidad de volumen extraído?	Depende del volumen de agua en el lago	Volumen del lago	El volumen de extracción es variable, depende del volumen del lago y es otorgado por el Consejo de Cuenca
9	¿Cuánto se paga por el agua del lago?	195 pesos por ha regada	50 pesos por ha regada	162.5 pesos por ha regada
10	¿Existen problemas de suelos afectados por sales, por el uso de agua del Lago de Chapala?	Si, 2,000 ha	No	No

### 2.3 Otros usos

Se habló con el subdelegado de pesca de SEMARNAT en Tizapán El Alto, Jalisco y realizando un recorrido por el Lago de Chapala, no se encontraron extracciones de agua para este uso ni para industria.

### 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MONITOREO DEL AGUA EN EL LAGO DE CHAPALA

En este capítulo se presenta la metodología que se utilizó para analizar estadísticamente los datos históricos de monitoreo de agua en el lago. El análisis de la información de la calidad del agua tiene como objetivo determinar qué tan mezclado se encuentra el sistema y si existe una tendencia de las concentraciones de los parámetros de calidad del agua con el volumen del lago y poder determinar la calidad de agua para diferentes volúmenes y con ello establecer las necesidades de tratamiento para diferentes usos.

#### 3.1 Base de datos de la calidad del agua

La base de datos de calidad del agua en el Lago de Chapala, consiste en mediciones de 39 parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Estos parámetros son: Temperatura, Turbiedad, pH, Alcalinidad Total, Alcalinidad Fenoftaleina, Dureza Total, Dureza de Calcio, CE, Color, Transparencia, OD, DBO<sub>5</sub>, DQO, N-Org, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub>, P-Tot, P-Ort, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, G y A, SAAM, Fenol, ST, STF, STV, SST, SSF, SSV, SDT, SDF, SDV, Cr(VI), Cu, Fe, Fe<sup>+2</sup>, Clorofila, Coliformes Totales y Fecales. Estos parámetros fueron medidos del periodo de abril 1974 hasta la fecha y son obtenidos en estaciones de monitoreo que se encuentran distribuidas por todo el lago (figura 3.1). Las muestras recolectadas de las estaciones de monitoreo son analizadas por el Centro de Estudios Limnológicos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la frecuencia del muestreo es de cada tres o cuatro meses.

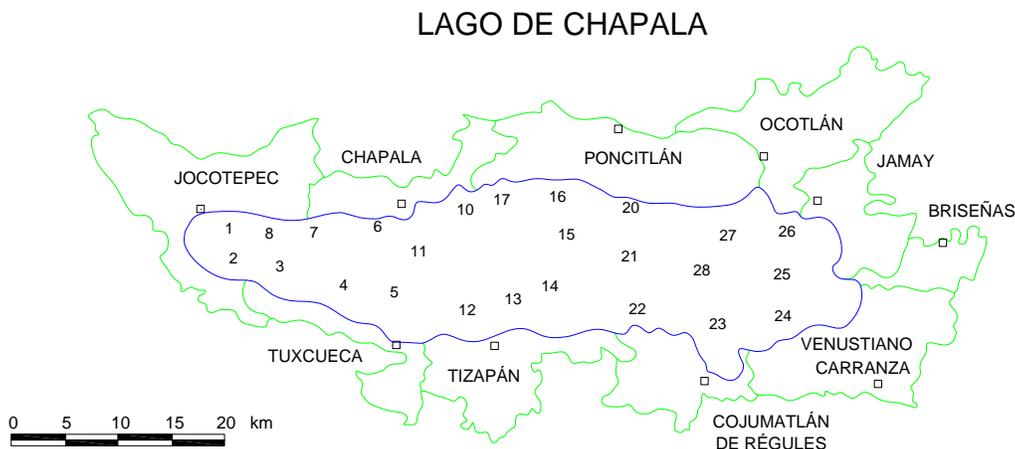


Figura 3.1 Localización de estaciones de muestreo.

### 3.2 Análisis y filtrado estadístico

Para determinar si el lago se encuentra bien mezclado y si existe una relación de las concentraciones de los parámetros de calidad del agua con el volumen del lago, se plantearon las siguientes preguntas:

1. ¿Se puede considerar al Lago de Chapala como un sistema homogéneo, es decir, se encuentra bien mezclado?
2. ¿Existe relación de la calidad del agua con el volumen del lago?

Para responder a las preguntas anteriores, se seleccionaron aquellos parámetros con más datos individuales, es decir, con mayor información de registros en la base de datos. Coincidió con que fueron los parámetros más conservativos, es decir, aquellos que no son afectados por procesos biológicos. Las concentraciones de estos parámetros sólo son reducidos por dilución e incluyen sustancias inorgánicas como cloruros, sulfatos, alcalinidad, dureza total y sólidos disueltos totales. El análisis estadístico se realizó primeramente para los parámetros conservativos previamente mencionados, calculando los siguientes parámetros estadísticos (Miller *et al.*, 1990):

1. Media aritmética o simplemente media, es un valor típico o representativo de un conjunto de datos, se conoce como medida de tendencia central, sirve para describir el punto medio o localización central de un conjunto de mediciones u observaciones y se define por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

2. Desviación estándar, es una medida de dispersión usada en estadística que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio en una distribución. La desviación estándar de un conjunto de datos es una medida de cuánto se desvían los datos de su media y se calcula de la siguiente manera:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

3. Por ciento de desviación estándar o coeficiente de variación. La desviación estándar es una medida de variación absoluta, esto es, mide la cantidad real de variación presente en un conjunto de datos y depende de la escala de medición. Para comparar la variación en diferentes conjuntos de datos, es preferible valerse de una medida de variación relativa; por ejemplo el coeficiente de variación (*CV*).

$$CV = \frac{s}{x}$$

Estos cálculos se realizaron para los datos de todo el lago por cada evento del muestreo del periodo 1974 a 2001. Una vez obtenido estos resultados, se realizó un filtrado estadístico de los datos, eliminando aquéllos con un *CV* > 0.10, 0.15 y 0.20.

Concentraciones individuales de los parámetros conservativos de calidad del agua, fueron promediadas para cada evento de muestreo y se determinaron la desviación estándar y el coeficiente de variación. Los resultados de este análisis y filtrado estadístico se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Parámetros de calidad del agua del Lago de Chapala de abril 1974 a diciembre 2001 y resultados del filtrado estadístico.**

	SDT	ALCALINIDAD	CLORUROS	SULFATOS	DUREZA T
No. de datos	2,318	2,514	1,383	763	2,302
No. de eventos de muestreo	122	134	71	40	116
Eventos con <i>CV</i> < 0.10	49.2	64.2	57.7	62.5	68.1
Eventos con <i>CV</i> < 0.15	76.2	77.6	70.4	70.0	83.6
Eventos con <i>CV</i> < 0.20	85.2	87.3	81.7	75.0	91.4

Se observa, que de 75.0 al 91.4% de la población de concentraciones medias, tienen un *CV* < 0.20, de 70.0 a 83.6% < 0.15 y de 49.2 al 68.1% < 0.10. Considerando la extensión de agua en el lago (700 – 1,000 km<sup>2</sup>), los resultados indican que no existe variación significativa en los parámetros conservativos en cada evento de muestreo. Por lo tanto, para los fines del presente trabajo el Lago de Chapala puede ser considerado como un sistema homogéneo, es decir, bien mezclado. Esto se debe a la acción del viento y a su poca profundidad (Lind y Dávalos-Lind, 2001, van Afferden y Hansen 2003).

### 3.3 Calidad del agua como función del volumen

Una vez que el Lago de Chapala puede ser considerado como un sistema mezclado, la segunda pregunta es determinar si existe una relación de la calidad del agua con el volumen del lago. A partir de los datos históricos de calidad del agua se construyeron gráficas concentración – volumen para cada parámetro.

Para ello, se construyó la siguiente tabla, donde cada columna corresponde a:

- C1: fecha del evento del muestreo.
- C2: número de las estaciones de muestreo.
- C3: concentraciones medidas en cada estación de muestreo.
- C4: concentración promedio por evento de muestreo.
- C5: número de estaciones con datos, por evento del muestreo.
- C6: desviación estándar por evento del muestreo.
- C7: % desviación estándar o *CV* por evento del muestreo.
- C8: volumen del lago correspondiente a la fecha de muestreo.

**Tabla 3.2 Análisis de los datos de calidad del agua, para la construcción de la gráfica volumen - concentración.**

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
FECHA	ESTACIÓN	SDT [mg/L]	PROMEDIO SDT [mg/L]	No. DE ESTACIONES	DESVIACION ESTÁNDAR	% DESVIACION ESTÁNDAR	VOLUMEN DEL LAGO [Mm3]	Filtro estadístico
Abr 74	1	286	298.00	22	60.90	20.44	7714	
Abr 74	2	284					7714	
Abr 74	3	308					7714	
Abr 74	4	250					7714	
Abr 74	5	190					7714	
Abr 74	6	232					7714	
Abr 74	7	198					7714	

Los puntos graficados se ajustaron a una línea de tendencia o regresión lineal, exponencial o potencial, dependiendo de la distribución del diagrama de dispersión y se calculó la ecuación de la regresión así como el coeficiente de determinación, para cada parámetro. Primeramente se graficó toda la población de datos, obteniendo la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de correlación, siendo éste de 0.617 para SDT y teniendo el siguiente comportamiento (figura 3.2).

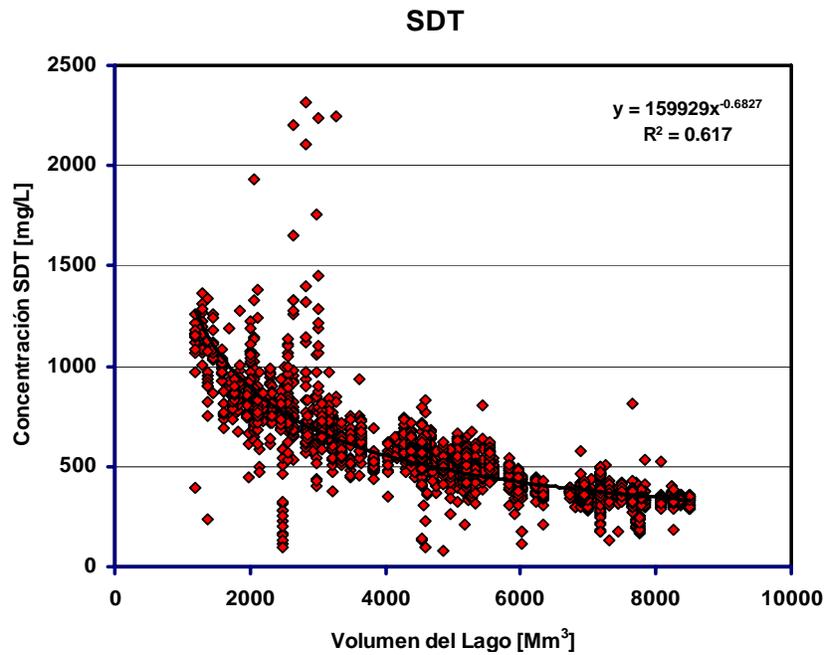


Figura 3.2 Concentración – volumen para SDT utilizando toda la población de datos.

A continuación, se construyó la gráfica concentración – volumen para SDT utilizando todos los promedios por evento de muestreo, obteniendo la gráfica que se muestra en la figura 3.3. Se observa una mejoría en la correlación de 0.617 a 0.7274.

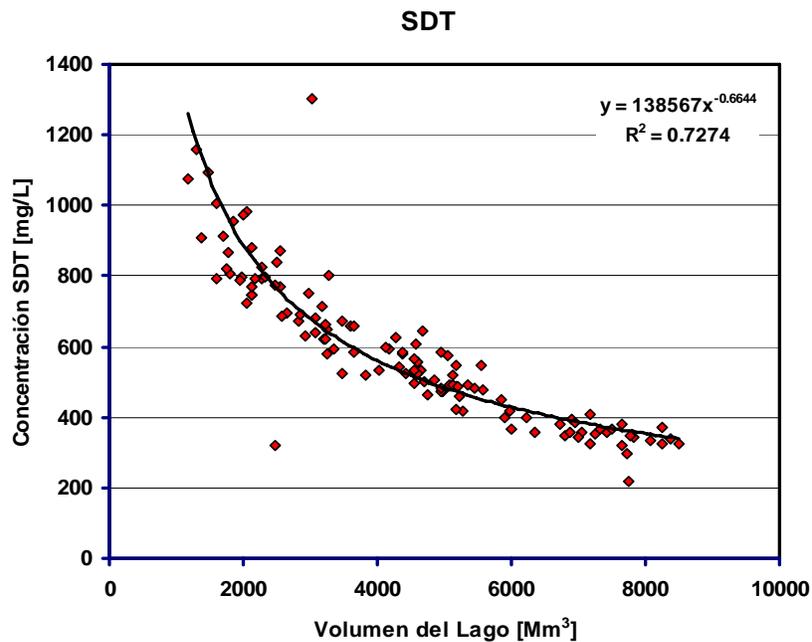


Figura 3.3 Concentración – volumen para SDT utilizando todos los promedios por evento de muestreo.

Eliminando los promedios con  $CV > 0.15$ , se eliminan aproximadamente 25% de la población original de datos. Este porcentaje refleja el error que pueda existir en el muestreo, análisis químicos, reporte y en la suposición de mezcla perfecta del agua del lago (figura 3.3).

Los promedios no eliminados, es decir aquellos con un  $CV < 0.15$ , fueron graficados con su respectiva desviación estándar contra el volumen del lago (figura 3.4).

Al utilizar esta metodología para la construcción de las gráficas concentración – volumen, el coeficiente de determinación llega a ser de 0.9077.

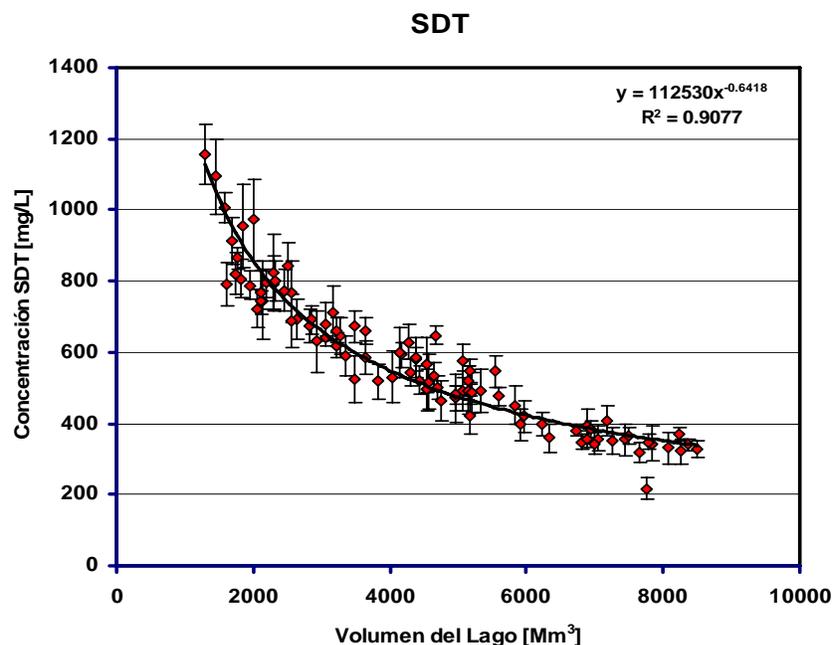


Figura 3.4 Concentración – volumen para SDT utilizando valores medios con  $CV < 0.15$ .

Graficando los datos filtrados para SDT se observa que la concentración de sólidos disueltos es inversamente proporcional al volumen del lago.

Se aplicó la misma metodología para los demás parámetros conservativos. Las gráficas obtenidas para estos parámetros se presentan a continuación.

### ALCALINIDAD TOTAL

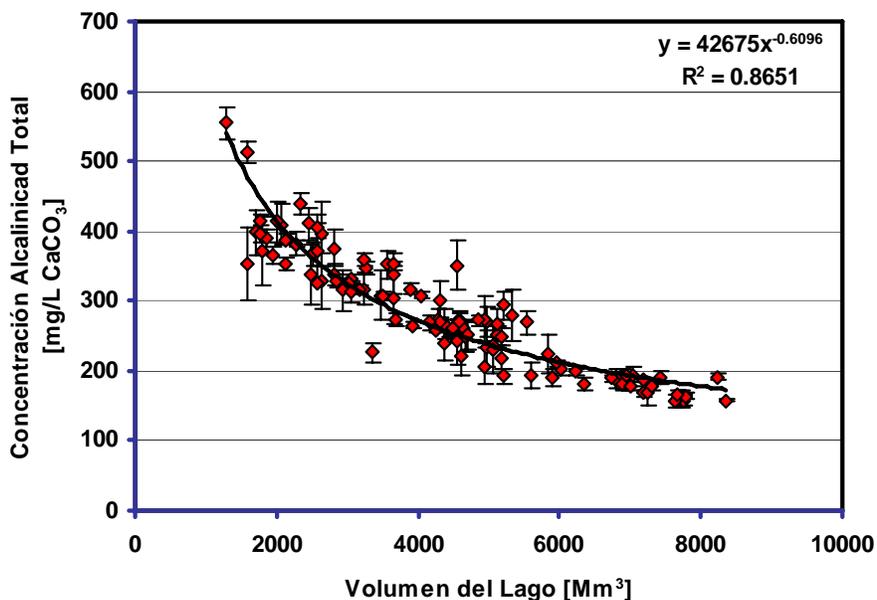


Figura 3.5 Promedios de ALCALINIDAD TOTAL como función del volumen de agua en el Lago de Chapala (CV < 0.15).

### CLORUROS

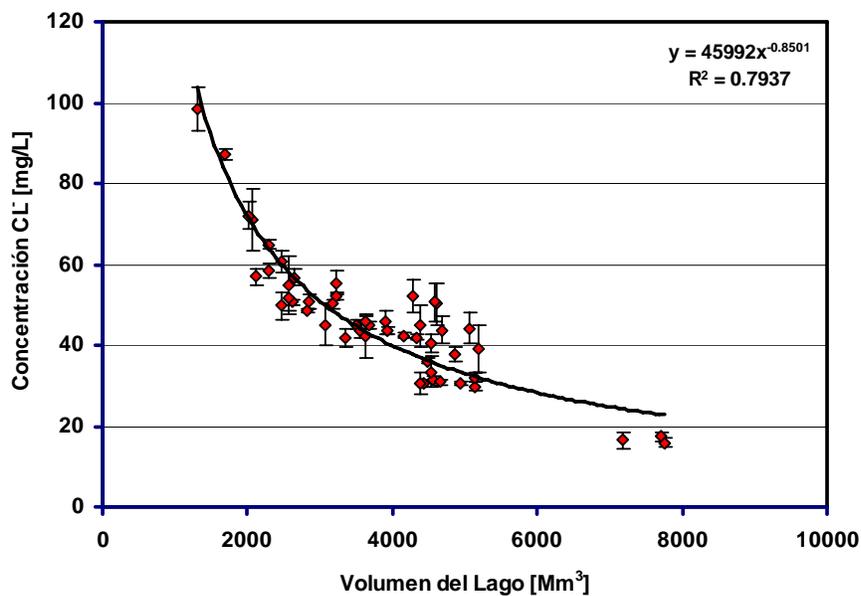


Figura 3.6 Promedios de CLORUROS como función del volumen de agua en el Lago de Chapala (CV < 0.15).

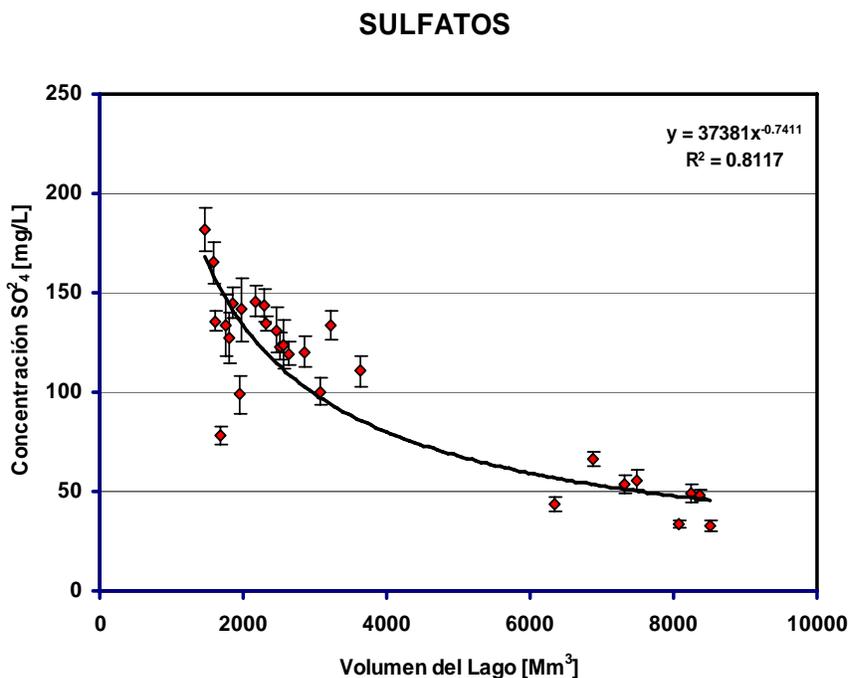


Figura 3.7 Promedios de SULFATOS como función del volumen de agua en el Lago de Chapala (CV < 0.15).

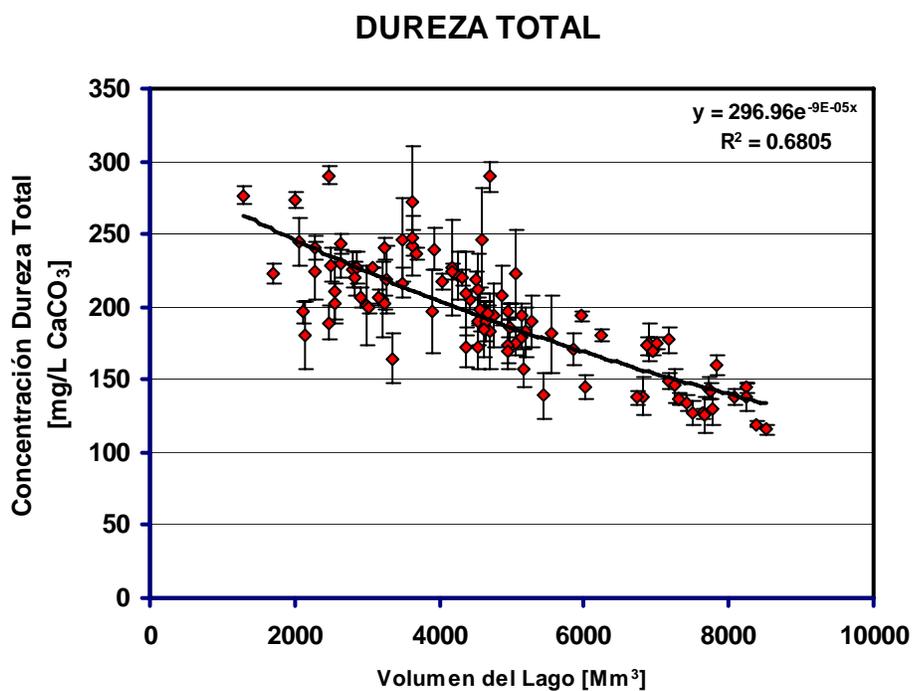


Figura 3.8 Promedios de DUREZA TOTAL como función del volumen de agua en el Lago de Chapala (CV < 0.15).

Esta metodología también fue aplicada para los demás parámetros de calidad del agua. Los resultados se presentan en la tabla 3.3 y Anexo 2.

**Tabla 3.3 Análisis estadístico de datos de monitoreo de calidad del agua en el Lago de Chapala.**

PARÁMETRO	UNIDADES	No. DE DATOS INDIVIDUALES	No. EVENTOS DE MUESTREO	RELACIÓN CON VOLUMEN (x) DEL LAGO	R <sup>2</sup>	CV (z)	% DE EVENTOS CON CV <z
SDV	mg/L	514	29	$y = -0.0159x + 210.43$	0.09	50	93.1
SDF	mg/L	514	29	$y = 76178x^{-0.6219}$	0.87	15	86.2
SSV	mg/L	512	29	$y = 7491.4x^{-0.7683}$	0.28	100	82.8
SSF	mg/L	514	29	$y = 1564.1x^{-0.4337}$	0.17	100	82.8
SST	mg/L	2579	134	$y = 173179x^{-1.0181}$	0.55	70	60.4
STV	mg/L	514	29	$y = 1200.3x^{-0.2384}$	0.14	50	96.6
STF	mg/L	513	29	$y = 74669x^{-0.608}$	0.86	15	82.8
ST	mg/L	797	43	$129065x^{-0.6499}$	0.95	15	76.7
SDT	mg/L	2318	122	$112530x^{0.6418}$	0.91	15	76.2
TEMPERATURA	°C	2236	113	$y = -0.0002x + 23.176$	0.04	15	97.3
pH	- log [H]	2558	133	$y = -5E-05x + 8.859$	0.09	15	97
DQO	mg/L	2118	115	$y = 81177x^{-0.9715}$	0.78	15	27.8
DBO <sub>5</sub>	mg/L	2551	133	$y = 53.016x^{-0.4072}$	0.16	40	51.1
OD	mg/L	2518	135	$y = 17.302x^{-0.1055}$	0.22	15	78.5
G y A	mg/L	670	35	$y = 3.5848e^{0.0003x}$	0.46	50	40
TURBIEDAD	mg/L	486	34	$y = 590.78x^{-0.3288}$	0.9	20	20.6
SULFATOS [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	mg/L	763	40	$y = 37381x^{-0.7411}$	0.81	15	70
SAAM	mg/L	705	38	$y = 0.2003e^{-9E-05x}$	0.69	15	18.4
DUREZA TOTAL	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2302	116	$y = 296.96e^{-9E-05x}$	0.68	15	83.6
DUREZA CALCIO	mg/L CaCO <sub>3</sub>	569	26	$y = -0.0064x + 136.15$	0.3	15	76.9
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L CaCO <sub>3</sub>	2514	134	$y = 42675x^{-0.6096}$	0.87	15	77.6
ALCALINIDAD FENOFTALEINA	mg/L CaCO <sub>3</sub>	784	42	$y = 70215x^{-0.9685}$	0.66	45	81
CLORUROS [Cl <sup>-</sup> ]	mg/L	1383	71	$y = 45992x^{-0.8501}$	0.79	15	70.4
ORTOFOSFATO	mg/L	1081	63	$y = 98.976x^{-0.6909}$	0.56	25	68.3
FÓSFORO TOTAL	mg/L	2462	132	$y = 25.157x^{-0.488}$	0.41	20	42.4
NITRÓGENO AMONIAICAL [N-NH <sub>3</sub> ]	mg/L	2520	131	$y = 428.22x^{-0.9366}$	0.24	70	59.5
NITRATOS [N-NO <sub>3</sub> ]	mg/L	2510	131	$y = 6E-05x - 0.0047$	0.48	30	26.7
NITRÓGENO ORGÁNICO [N-N <sub>ORG</sub> ]	mg/L	1015	48	$y = -6E-05x + 1.5194$	0.05	50	85.4
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	umhos/cm	558	33	$y = 126971x^{0.6138}$	0.81	15	81.8
DISCO DE SECCHI	m	487	32	$y = 0.0043x^{0.4924}$	0.78	15	28.1
CLOROFILA-A	mg/m <sup>3</sup>	306	54	$y = 1E+06x^{-1.4388}$	0.43	50	57.4
COLOR	UPC	336	15	$y = 21.057e^{0.0004x}$	0.37	50	80

Se observa que no fue posible utilizar un filtrado con  $CV < 0.15$  para todos los parámetros. Los parámetros que tuvieron mejor correlación con el volumen del lago son: SDF, SST, STF, ST, SDT, DQO, Turbiedad,  $SO_4^{-2}$ , SAAM, Dureza Total, Alcalinidad Total, Alcalinidad Fenofaleína,  $Cl^-$ , P-Ort, CE, y Transparencia, con coeficientes de correlación de 0.55 a 0.95. Para Fenoles,  $Cr(IV)$ , Cu, Fe,  $Fe^{+2}$ , Coliformes Fecales y Totales, no se encontró una relación concentración – volumen debido a la baja estabilidad de estos parámetros y/o a los pocos datos existentes.

Analizando estadísticamente los parámetros conservativos de calidad del agua de lago, se puede observar, que el agua se encuentra bien mezclado, además se observa una alta tendencia o relación de la concentración de diversos parámetros con el volumen del lago. Esto se debe a que existe una dilución cuando los volúmenes de agua en el lago son altos y cuando los volúmenes son bajos el contaminante se concentra. Usando las fórmulas calibradas para cada parámetro, podemos calcular y predecir de forma aproximada y sin necesidad de análisis adicionales, cuál es la calidad del agua en el lago para diferentes volúmenes. Se puede determinar en qué volumen del lago empieza a presentar problemas con la calidad del agua para diferentes usuarios del lago y definir necesidades de tratamiento. También se podría aplicar en un sistema de alerta de la calidad del agua para diferentes usos.

## 4 NECESIDADES DE TRATAMIENTO

Los objetivos de este capítulo son:

1. Conocer los parámetros de calidad del agua, que rebasan los límites de la normatividad mexicana para diferentes usos, determinando a que volumen del lago se rebasan estos límites.
2. Determinar los sitios más apropiados para los respectivos tratamientos.

### 4.1 Calidad del agua y normatividad

En el capítulo 3 se observaron las concentraciones de los parámetros de calidad del agua como función del volumen del lago. Con las ecuaciones obtenidas del análisis estadístico de los datos de monitoreo para cada parámetro, se determinaron sus concentraciones respectivas para diferentes volúmenes del lago (1,000, 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>). Estos volúmenes fueron seleccionados porque se encuentran en el intervalo de volúmenes promedios anuales que se han presentado en los últimos años (Aguilar, 2005).

Una vez determinadas las concentraciones de los parámetros de calidad del agua para estos volúmenes, se compararon con la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) para suministro urbano y con CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) para uso agrícola, definiendo aquellos que rebasan los límites máximos permisibles.

En la figura 4.1, se muestra un ejemplo de las necesidades de tratamiento de agua en el Lago de Chapala para suministro urbano y riego agrícola respecto a los SDT en función del volumen del lago. Las líneas horizontales se representan los límites máximos permisibles para suministro urbano y riego agrícola que marca la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) y los CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) respectivamente para este parámetro. Se observa que cuando el volumen del lago es 1,570 Mm<sup>3</sup> (o menor), se requiere reducir los SDT para suministro urbano, mientras que para uso agrícola el volumen del lago tiene que estar por arriba de 4,625 Mm<sup>3</sup> para no tener que reducir la concentración de este parámetro.

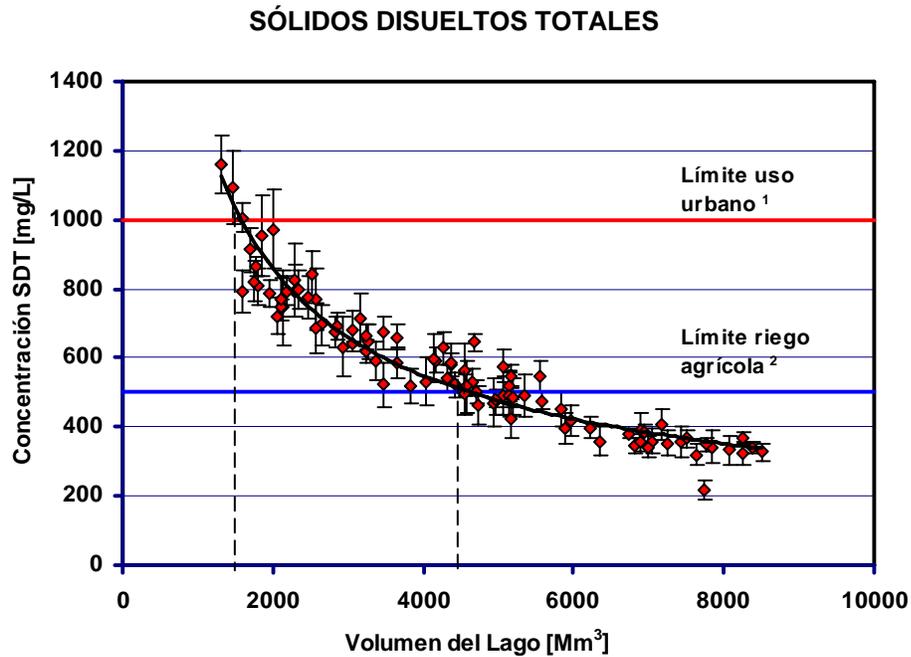


Figura 4.1 Necesidades de tratamiento de agua para SDT.

<sup>1</sup> (DOF,2000) NOM-127-SSA-1994 (1,000 mg/L)

<sup>2</sup> (DOF, 1989) CE-CCA-001/89 (500 mg/L)

También se calcularon los gastos de tratamiento para los usos anteriores, a partir de los volúmenes anuales extraídos en cada estación de bombeo (ver capítulo 2).

## 4.2 Volúmenes mínimos del lago para satisfacer la calidad del agua

Los parámetros que se encuentran fuera de la normatividad mexicana para suministro urbano, riego agrícola o protección de la vida acuática, así como el volumen mínimo del lago, para cumplir con los límites máximos permisibles de cada parámetro, se presentan en la tabla 4.1.

Se observa que para cualquier volumen en el lago, se requieren reducir las concentraciones de Grasas y Aceites, Turbiedad, Color, Coliformes Totales y Fecales para suministro urbano, Coliformes Fecales para agricultura y Turbiedad,  $\text{SO}_4^{2-}$  y Coliformes Fecales para la protección de vida acuática.

Tabla 4.1 Volúmenes mínimos del lago para garantizar la calidad del agua para diferentes usos.

Parámetro	Usos		
	Suministro urbano	Riego agrícola +	Protección vida de acuática +
SST	n.s. +	2,996	n.r.
ST	1,770 +	n.r.	n.r.
pH	7,180 *	n.r.	n.r.
SDT	1,570 *	4,625	n.r.
G y A	c.n. *	n.r.	n.r.
TURBIEDAD [UTN]	c.n. *	n.r.	c.n.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	n.s. *	2,078	c.n.
ALCALINIDAD TOTAL	2,123 +	n.r.	n.r.
N-NH <sub>3</sub>	1,383 *	n.s.	n.r.
C.E. [μmho/cm]	n.r.	2,675	n.r.
COLOR [Pt-Co]	c.n. *	n.r.	n.r.
COLIFORMES TOTALES [NMP/100 ml]	c.n. *	n.r.	n.r.
COLIFORMES FECALES [NMP/100 ml]	c.n. *	c.n.	c.n.

[n.r.] no regulado [n.s.] no sobrepasa [c.n.] cualquier volumen < 9,000 [Mm<sup>3</sup>]  
Unidades en mg/L si no se indican otras

\* (DOF,2000) NOM-127-SSA-1994

+ (DOF, 1989) CE-CCA-001/89

#### 4.2.1 Suministro urbano

Se presentan los parámetros que requieren reducir su concentración a través de tratamiento del agua para diferentes volúmenes del lago (tabla 4.2).

Se observan que las concentraciones de los parámetros de calidad del agua disminuyen cuando el volumen de agua en el lago aumenta, a excepción de Color, Coliformes Totales y Fecales. Estas concentraciones se compararon con la normatividad de agua para suministro urbano y se determinó que cuando el volumen de agua en el lago es 1,000 Mm<sup>3</sup> se deben reducir las concentraciones de ST, SDT, pH, G y A, Turbiedad, Alcalinidad Total, N-NH<sub>3</sub>, Color, Coliformes Fecales y Totales y cuando el volumen está en 4,000 Mm<sup>3</sup> sólo se deben reducir las concentraciones de pH, G y A, Turbiedad, Color, Coliformes Fecales y Totales. Por lo que es conveniente que el lago se mantenga en un volumen alto para que las necesidades de tratamiento se reduzcan.

Tabla 4.2 Parámetros que rebasan los límites para suministro urbano a diferentes volúmenes del lago.

Parámetro	Volumen de lago [Mm <sup>3</sup> ]				Límite
	1,000	2,000	3,000	4,000	
SST	152.83	75.46	49.94	37.26	500 +
ST	1,449.13	923.57	709.62	588.61	1,000 +
SDT	1,336.19	856.38	660.16	548.87	1,000 *
TEMPERATURA [°C]	22.98	22.78	22.58	22.38	n.r.
pH	8.81	8.76	8.71	8.66	8.5 *
DQO	98.84	50.41	33.99	25.71	n.r.
DBO <sub>5</sub>	3.18	2.40	2.03	1.81	n.r.
OD	8.35	7.76	7.43	7.21	> 4 +
G y A	4.84	6.53	8.82	11.90	Ausente *
TURBIEDAD [UTN]	60.96	48.53	42.48	38.64	5 *
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	223.54	133.74	99.03	80.01	400 *
SAAM	0.18	0.17	0.15	0.14	0.5 *
DUREZA TOTAL	271.40	248.04	226.69	207.18	500 *
ALCALINIDAD TOTAL	632.96	414.83	323.98	271.87	400 +
Cl <sup>-</sup>	64.92	33.60	22.86	17.39	250 *
P TOTAL	0.86	0.62	0.51	0.44	n.r.
N-NH <sub>3</sub>	0.66	0.35	0.24	0.18	0.5 *
N-NO <sub>3</sub>	0.06	0.12	0.18	0.24	10 *
N-N <sub>ORG</sub>	1.46	1.40	1.34	1.28	n.r.
CE [µmho/cm]	1,829.38	1,195.45	932.07	781.20	n.r.
COLOR [Pt-Co]	31.41	46.86	69.91	104.30	20 *
COLIFORMES TOTALES [NMP/100 ml]	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	Ausente *
COLIFORMES FECALES [NMP/100 ml]	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	Ausente *

Unidades en mg/L si no se indican otras. [n.r.] no regulado

\* (DOF,2000) NOM-127-SSA-1994

+ (DOF, 1989) CE-CCA-001/89

<sup>1</sup> Valor promedio

Actualmente existen sitios de tratamiento para la ciudad de Guadalajara. Estas plantas potabilizadoras No.1 y 2 se ubican a 42.5 km de la estación de bombeo en la falda del cerro el Cuatro. El tipo de tratamiento actual de las plantas potabilizadoras se especifica en el capítulo 5.4. El gasto a tratar para este uso es 519,567 m<sup>3</sup>/día (6,014 lps) y fue calculado a partir de los volúmenes anuales extraídos para abastecer a la ciudad de Guadalajara (capítulo 2.2).

#### 4.2.2 Uso agrícola

Para uso agrícola, los parámetros que requieren reducir su concentración para cumplir con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) para

diferentes volúmenes del lago se presentan en la tabla 4.3. Se observa que para un volumen de agua en el lago de 1,000 Mm<sup>3</sup> se rebasan los límites de SST, SDT, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, CE y Coliformes Fecales, mientras que para un volumen de 4,000 Mm<sup>3</sup>, únicamente se tendrían que reducir los SDT y Coliformes Fecales por lo que a volúmenes mayores aumenta la calidad de agua en el lago y se disminuyen las necesidades de tratamiento.

**Tabla 4.3 Parámetros que rebasan los límites para riego agrícola a diferentes volúmenes del lago.**

Parámetro	Volumen de lago [Mm <sup>3</sup> ]				Límite
	1,000	2,000	3,000	4,000	
SST	152.83	75.46	49.94	37.26	50 +
ST	1449.13	923.57	709.62	588.61	n.r.
SDT	1,336.19	856.38	660.16	548.87	500 +
TEMPERATURA [°C]	22.98	22.78	22.58	22.38	n.r.
pH	8.81	8.76	8.71	8.66	9 +
DQO	98.84	50.41	33.99	25.71	n.r.
DBO <sub>5</sub>	3.18	2.40	2.03	1.81	n.r.
OD	8.35	7.76	7.43	7.21	n.r.
G y A	4.84	6.53	8.82	11.90	n.r.
TURBIEDAD [UTN]	60.96	48.53	42.48	38.64	n.r.
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	223.54	133.74	99.03	80.01	130 +
SAAM	0.18	0.17	0.15	0.14	n.r.
DUREZA TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	271.40	248.04	226.69	207.18	n.r.
ALCALINIDAD TOTAL (CaCO <sub>3</sub> )	632.96	414.83	323.98	271.87	n.r.
Cl <sup>-</sup>	64.92	33.60	22.86	17.39	147.5 +
P TOTAL	0.86	0.62	0.51	0.44	n.r.
N-NH <sub>3</sub>	0.66	0.35	0.24	0.18	n.r.
N-NO <sub>3</sub>	0.06	0.12	0.18	0.24	n.r.
N-NORG	1.46	1.40	1.34	1.28	n.r.
CE [µmho/cm]	1,829.38	1,195.45	932.07	781.20	1,000 +
COLOR [Pt-Co]	31.41	46.86	69.91	104.30	n.r.
COLIFORMES TOTALES [NMP/100 ml]	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	1,693.60 <sup>1</sup>	n.r.
COLIFORMES FECALES [NMP/100 ml]	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	672.58 <sup>1</sup>	1000 +

Unidades en mg/L si no se indican otras. [n.r.] no regulado

+ (DOF, 1989) CE-CCA-001/89

<sup>1</sup> Valor promedio

En la tabla anterior no se consideran los datos de Boro, RAS (Relación de Absorción de Sodio) y Bicarbonato o Carbonato de Sodio Residual, importantes para evaluar el agua que se pretenda utilizar en riego agrícola para la protección se suelos, acuíferos y cultivos (Ramírez, 1988).

Para agricultura existen tres módulos de extracción (ver capítulo 2), se presentan los gastos para cada uno de ellos (tabla 4.4), que se calcularon a partir de los volúmenes anuales de extracción divididos entre 6 meses que es el periodo de extracción de agua para riego en un año. Estos sitios son los mismos que son utilizados en el capítulo 5 para calcular el costo de tratamiento de agua para diferentes usos.

**Tabla 4.4 Gastos de agua a tratamiento para uso agrícola.**

Planta de bombeo	Volumen de lago		
	2,000 [Mm <sup>3</sup> ]	3,000 [Mm <sup>3</sup> ]	4,000 [Mm <sup>3</sup> ]
	Gasto [lps]	Gasto [lps]	Gasto [lps]
Distrito de riego 013, módulo Ejido Modelo	9	34	60
Distrito de riego 013, módulo El Fuerte	73	244	416
Distrito de riego 024, La Palma	209	1,091	1,972

## 5 ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se presentan las operaciones unitarias más utilizadas para la potabilización del agua. Se seleccionan las que permitan reducir las concentraciones de los parámetros que exceden la normatividad para diferentes volúmenes del lago (capítulo 4), y se obtienen los costos de tratamiento para estos usos, para diferentes volúmenes del agua en el lago.

### 5.1 Métodos de potabilización

Los métodos para la potabilización de agua, dependen básicamente de las características del agua cruda. La selección del proceso de tratamiento se hace con base en la experiencia y en estudios de tratabilidad realizados en el laboratorio o con plantas piloto, en cada región en particular (Romero, 1999). En la tabla 5.1 se resumen las operaciones unitarias para la potabilización del agua más utilizadas en la actualidad.

El manejo de los residuos sólidos producidos en el tratamiento para la potabilización de las aguas no ha recibido suficiente atención por parte de los diseñadores y operadores de plantas potabilizadoras (IMTA, 2004), se ha hecho con cierta negligencia y se vierten a cuerpos receptores (lagos, ríos o suelo) o en el mejor de los casos, se deposita en rellenos sanitarios (IMTA, 2004). En México la Norma Oficial Mexicana que regula la disposición de estos es la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002). Esta norma establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al ambiente y la salud pública.

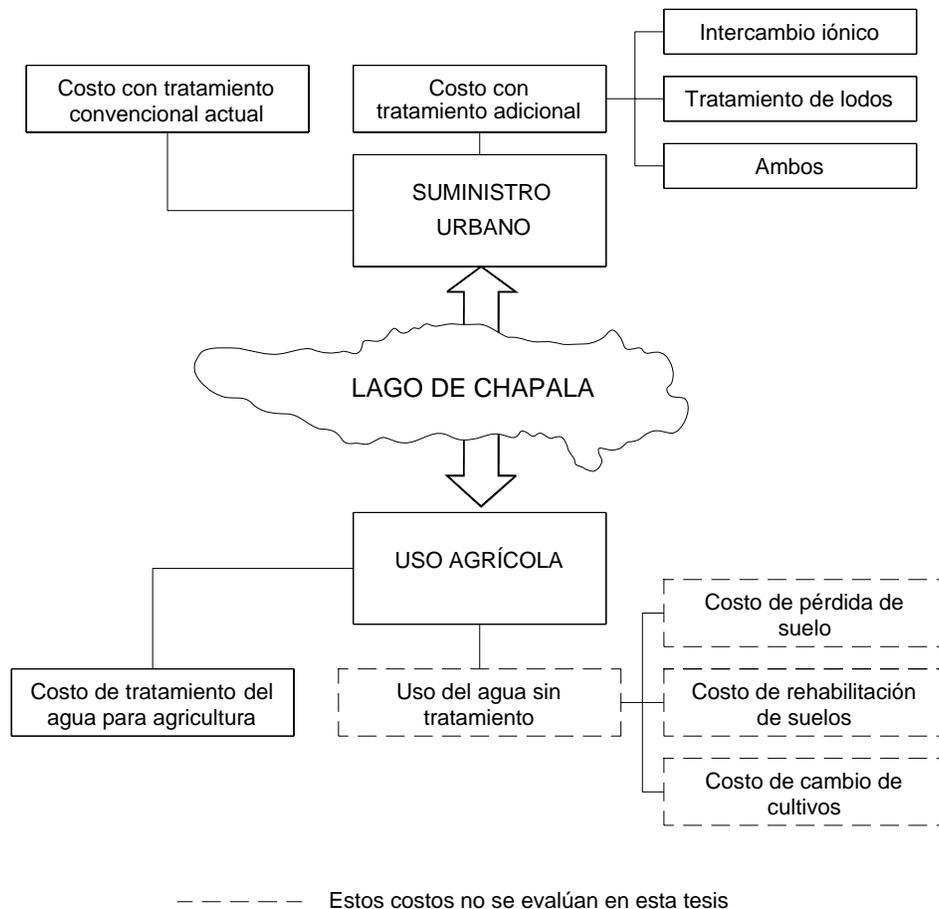
**Tabla 5.1 Operaciones unitarias utilizadas en la potabilización del agua.**

Operación unitaria	Propósito	Referencia
Rejillas (cribado)	Remoción de sólidos gruesos que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta.	Metcalf y Eddy, 1996
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color.	Romero, 1999
Presedimentación	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentables.	Romero, 1999
Medición de caudal	Medida de agua cruda por tratar.	Romero, 1999
Aireación	Remoción de olores y gases disueltos; adición de oxígeno para dar sabor.	Romero, 1999
Coagulación / Floculación	Conversión de sólidos no sedimentables en sedimentables. Eliminación de sólidos suspendidos (orgánicos, inorgánicos o biológicos) que por su tamaño (<10 $\mu\text{m}$ ) no sedimentan por gravedad. Remoción de color producido por material orgánico natural, turbiedad, sólidos suspendidos, materia coloidal, microorganismos. Remoción de ciertos materiales solubles por adsorción o precipitación (varios metales pesados, Fósforo). Reducción de Alcalinidad y pH en el agua.	IMTA, 2004.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables. Eliminación flóculos químicos. Obtención de un efluente clarificado y producción de lodo de fácil manejo.	Metcalf y Eddy, 1996
Ablandamiento	Remoción de Dureza.	Romero, 1999
Filtración	Remoción de sólidos finos y sustancias coloidales medidos como Turbiedad, flóculos en suspensión, metales oxidados, precipitados húmicos, microorganismos y ciertos problemas de color y sabor en el agua.	Romero, 1999 IMTA, 2004.
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas y color.	Romero, 1999
Desinfección	Eliminación de organismos patógenos que causan enfermedades, mediante agentes químicos o físicos llamados desinfectantes. La cloración es el método más ampliamente utilizado.	Romero, 1999
Tratamiento Avanzado	Eliminación de sustancias inorgánicas disueltas en el agua. Entre los métodos para la eliminación de SDT se encuentra: intercambio iónico, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis.	Metcalf y Eddy, 1996

## 5.2 Escenarios a evaluar

Los escenarios a evaluar se señalan en la figura 5.1. Se determinan los costos de potabilización del agua para suministro urbano, considerando 1. El tratamiento convencional actual y 2. Incluyendo tratamiento avanzado (intercambio iónico) y tratamiento de los lodos. Actualmente, los lodos no se tratan en las plantas potabilizadoras existentes y tienen que acondicionarse y disponerse como lo marca la

NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002). Por otra parte se determina los costos de tratamiento para uso agrícola necesario para cumplir con los con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) para este uso. Este ejercicio sirve para considerar el valor económico del lago para diferentes volúmenes (ver capítulo 2 y figura 5.1).



**Figura 5.1 Diagrama de los escenarios a evaluar.**

El tratamiento de agua para la agricultura no se lleva a cabo debido a los altos costos que representa; sin embargo, se estimarán los costos hipotéticos de tratamiento para este uso. Si el agua para riego no se trata como actualmente sucede, se generan otros problemas como pérdidas de suelo por exceso de sales o costos en la rehabilitación de suelos salinos o pérdidas por la baja productividad del suelo. Por ello, es importante conocer estos costos para compararlos con los costos de tratamiento de agua para uso agrícola y así poder tomar decisiones sustentables a mediano y corto plazo.

La utilización de agua de riego con altas concentraciones de sales, acelera el proceso de salinización de suelos agrícolas (Palacios *et al.*, 2000), esto se puede ver actualmente en 2,000 ha de suelo agrícola en el distrito de riego 024 que son afectadas por sales debido a la utilización de agua sin tratar del Lago de Chapala (Arceo, 2005).

### 5.3 Capdet Works 2.0

(Computer Assisted Procedure for the Design and Evaluation of Water Treatment Systems), es un paquete de computadora creado en 1985, conjuntamente por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers) y La Agencia estadounidense de Protección al Ambiente EPA (Environmental Protection Agency), para el diseño y evaluación de sistemas de tratamiento de agua; adaptado a las computadoras personales por la empresa canadiense Hydromantis, Inc. El Capdet Works es un programa utilizado para el diseño preliminar y estimación de costos de construcción de plantas de tratamiento de agua y permite calcular el dimensionamiento de cada operación unitaria basada en las características del influente y determina su costo (Hidromantis, 2001). A continuación se describen algunas partes del programa, así como los datos de entrada requeridos por el programa y los resultados esperados.

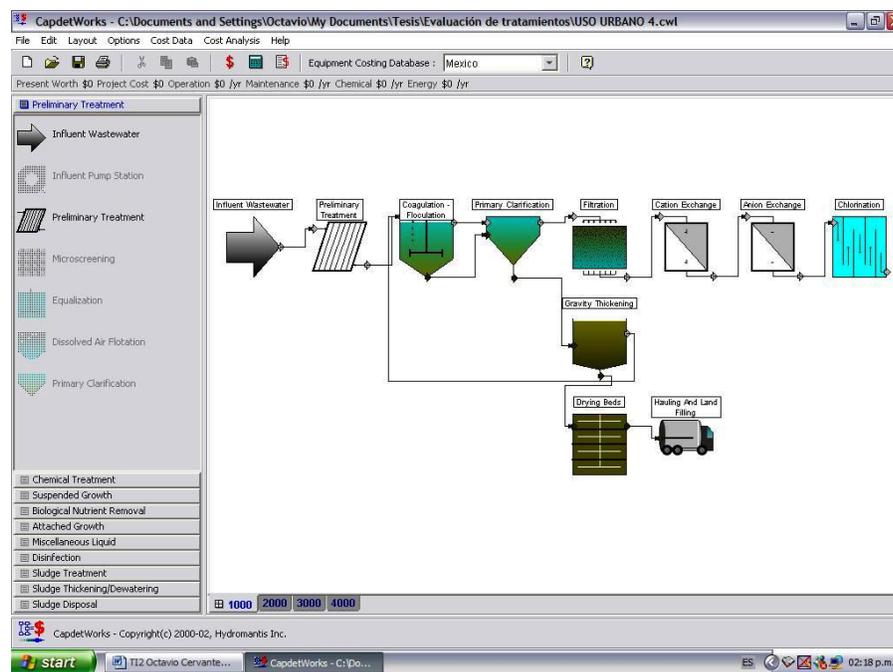


Figura 5.2 Programa Capdet Works ver. 2.0 para la estimación de costos de tratamiento.

En la figura 5.2 se muestra la estructura del programa, se observan los diferentes métodos de tratamiento de agua y lodos que incluye y el área de trabajo para la construcción del tren de tratamiento. El programa permite emplear varios tipos de unidades de proceso, en donde un tren de tratamiento consiste en la combinación de varias unidades colocadas en orden secuencial según el recorrido del agua a tratar. Para construir el tren de tratamiento, hay que seleccionar una a una las unidades de proceso e insertarlas en el área de trabajo en forma secuencial. Una vez introducidas las unidades de proceso se unen con flechas para formar el tren de tratamiento. Cada unidad de tratamiento tiene una ficha donde se pueden cambiar los parámetros de diseño. En esta parte se pueden cambiar los valores que por omisión proporciona el paquete, introduciendo los valores de caracterización del agua a tratar para el caso de la ficha de influente y los parámetros de diseños para el caso de las unidades de proceso (Hidromantis, 2001). A continuación se presentan en la tabla 5.2 los parámetros de calidad del agua que requiere el programa para la estimación de los diferentes costos de tratamiento. Estos parámetros fueron actualizados con la información obtenida en el capítulo 4.

**Tabla 5.2 Parámetros de calidad del agua requeridos por el programa.**

Datos de entrada influente	
Parámetro	Unidad
Gasto promedio	L/s
Gasto mínimo	L/s
Gasto máximo	L/s
SS	mg/L
% SSV	%
DBO <sub>5</sub>	mg/L
DBO soluble	mg/L
DQO	mg/L
DQO soluble	mg/L
NKT	mg/L
PT	mg/L
N-NH <sub>3</sub>	mg/L
pH	-log [H]
Cationes	mg/L
Aniones	mg/L
Ssed	ml/L
G y A	mg/L
N-NO <sub>2</sub>	mg/L
N-NO <sub>3</sub>	mg/L
Fracción de SSV no degradable	%
Temperatura verano	°C
Temperatura invierno	°C

El paquete tiene una serie de precios unitarios que pueden ser introducidos en dólares americanos o en pesos mexicanos, los cuales pueden ser modificados por el usuario sin importar su orden. Los precios unitarios que requiere el programa y que se actualizaron para el año de análisis (2004) se observan en la tabla 5.3.

**Tabla 5.3 Precios unitarios requeridos por el programa Capdet Works.  
Datos de entrada**

<b>Costos unitarios</b>	<b>Unidad</b>	<b>PU</b>
Costo de construcción	\$/m <sup>2</sup>	1,780.00
Excavación	\$/m <sup>3</sup>	56.30
Muro de concreto	\$/m <sup>3</sup>	3,000.00
Losa de concreto	\$/m <sup>3</sup>	3,000.00
Renta de grúa	\$/hr	250.00
Energía eléctrica	\$/kwh	0.97
Costo de terreno	\$/ha	100,000.00
<b>Costos de trabajo</b>	<b>Unidad</b>	<b>PU</b>
Mano de obra	\$/hr	18.80
Operador de maquinaria	\$/hr	56.30
Administración	\$/hr	31.30
Instalador de tubería	\$/hr	28.80
<b>Costos de reactivos químicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>PU</b>
Cal	\$/kg	1.50
Aluminio	\$/kg	1.50
Hierro	\$/kg	1.00
Polímero	\$/kg	10.00
<b>COSTOS DE TUBERÍA</b>	<b>Unidad</b>	<b>PU</b>
Tubería 8" Ø	\$/m	768.00
Codo 8" Ø	\$/pza	1,340.00
Tee 8" Ø	\$/pza	1,640.00
Válvula 8" Ø	\$/pza	5,910.00
<b>Índices financieros</b>	<b>Unidad</b>	
Tasa de interés	%	8.73
Periodo de construcción	años	2.00
Vida de operación de la planta	años	20.00

Para la actualización de los precios unitarios mencionados anteriormente se utilizó el Catálogo General de Precios Unitarios para la Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado 2004 elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CNA), así como información de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) para la actualización de costos de construcción y de la Comisión Federal de Electricidad

(CFE) para actualizar precios de energía eléctrica para el año 2004. Una vez definido el tren de tratamiento y actualizado los parámetros de diseño para cada unidad de proceso y los precios unitarios señalados anteriormente, se realizó el análisis de costos, obteniendo los siguientes costos de tratamiento: valor presente de la planta, costo de construcción (obra civil), operación, mantenimiento, sustancias químicas, energía eléctrica y amortización (figura 5.3).

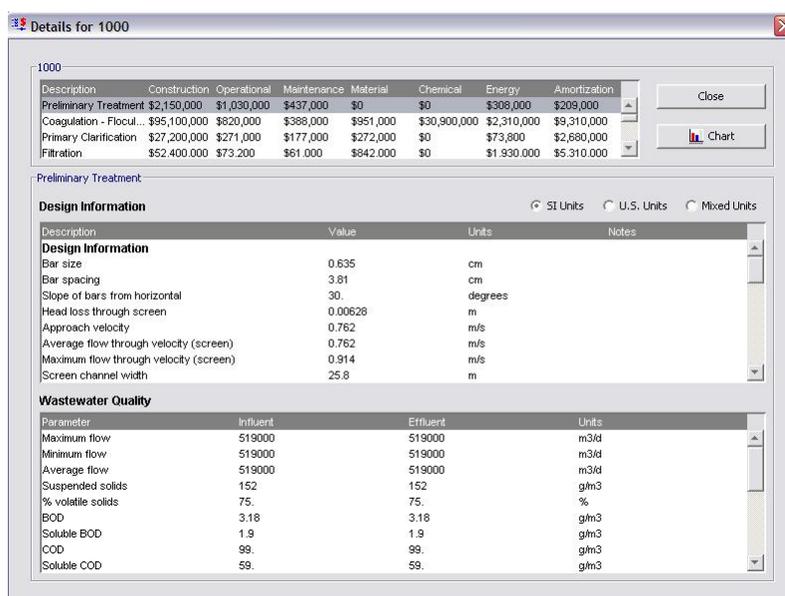


Figura 5.3 Detalle de resultados: información de diseño y costos de tratamiento para cada unidad de proceso.

También el programa despliega (figura 5.4) gráficamente los resultados de los diferentes costos de tratamiento analizados para cada unidad de proceso del tren de tratamiento.

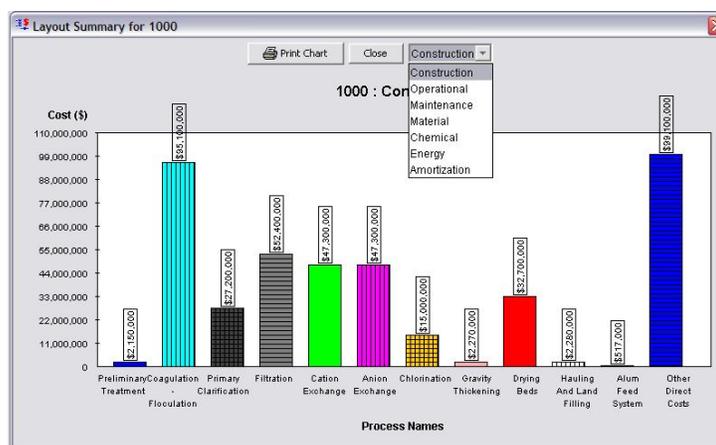


Figura 5.4 Resumen de costos de tratamiento para cada unidad de proceso.

Con este programa se evaluaron los costos de tratamiento para los diferentes escenarios vistos anteriormente.

## 5.4 Potabilización

A continuación se muestran los trenes de tratamiento para la potabilización del agua para suministro urbano.

### 5.4.1 Tratamiento existente

El agua extraída del Lago de Chapala es actualmente tratada por dos plantas potabilizadoras antes de ser distribuida a los usuarios. El tratamiento que recibe el agua del lago para suministro urbano es convencional e incluye las siguientes operaciones unitarias: rejillas, coagulación – floculación, sedimentación, filtración y desinfección (figura 5.5). Este tratamiento es apropiado para aguas de origen superficial (lagos) con Turbiedad excediendo de 20 a 50 UTN durante un largo periodo de tiempo (AWWA, 2002).

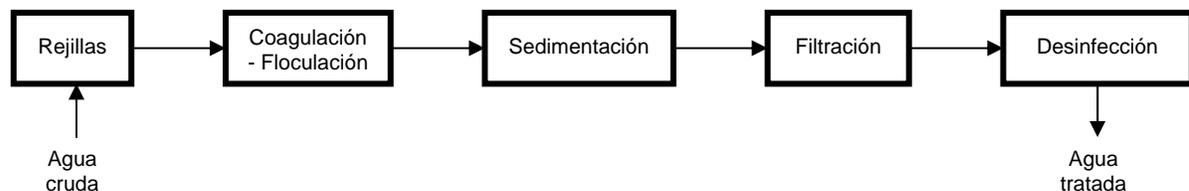


Figura 5.5 Tren de tratamiento convencional, plantas potabilizadoras 1 y 2.

Características generales (SIAPA, 1988, Reynoso, 2005):

1. Capacidad teórica 6 m<sup>3</sup>/s.
2. Coagulante: sulfato de aluminio y polielectrolito catiónico.
3. Filtración tipo convencional de grava y arena sílica de flujo descendente.
4. No existe tratamiento de lodos.
5. Desinfección con cloro.

### 5.4.2 Tratamiento adicional

Para determinar si el tratamiento actual es suficiente para el cumplir con la norma para varios volúmenes del lago, se realizó un análisis a los datos de la calidad del agua en las plantas potabilizadoras. Estos datos consisten en concentraciones de 42 parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos que se miden en el influente y efluente.

El periodo de mediciones es de enero 1993 a diciembre 2004. Esta información fue proporcionada por el departamento de potabilización del Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). Las concentraciones para cada parámetro fueron graficadas como función del volumen del lago para determinar la eficiencia del tratamiento actual. A continuación se presenta el comportamiento de las concentraciones del influente y efluente de las plantas potabilizadoras para algunos parámetros.

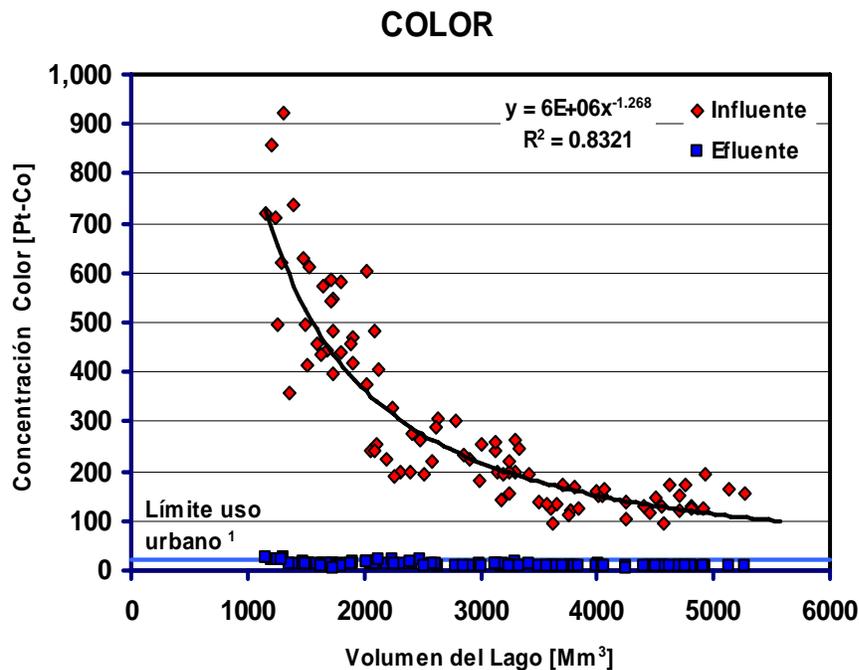


Figura 5.6 Comportamiento de color como función del volumen del lago.

<sup>1</sup> (DOF, 2000) NOM-127-SSA-1994 (20 U Pt-Co)

En la figura 5.6 se presenta la relación entre el Color del influente con el volumen del lago y las concentraciones de Color después del tratamiento (efluente) y se indica el límite permisible para este uso. Se observa que para este parámetro las concentraciones del efluente cumplen con la norma para cualquier volumen de agua en el lago. La Turbiedad tuvo un comportamiento similar al Color y se observa en la figura 5.7. Las concentraciones de Turbiedad del efluente cumplen con la norma para suministro urbano para cualquier volumen de agua en el lago. Para SDT se observa una alta relación de la concentración del influente con el volumen del lago (figura 5.8), es decir, las

concentraciones se ajustan a una línea de regresión con  $R^2 = 0.88$ , tal como se observó en el capítulo 3.

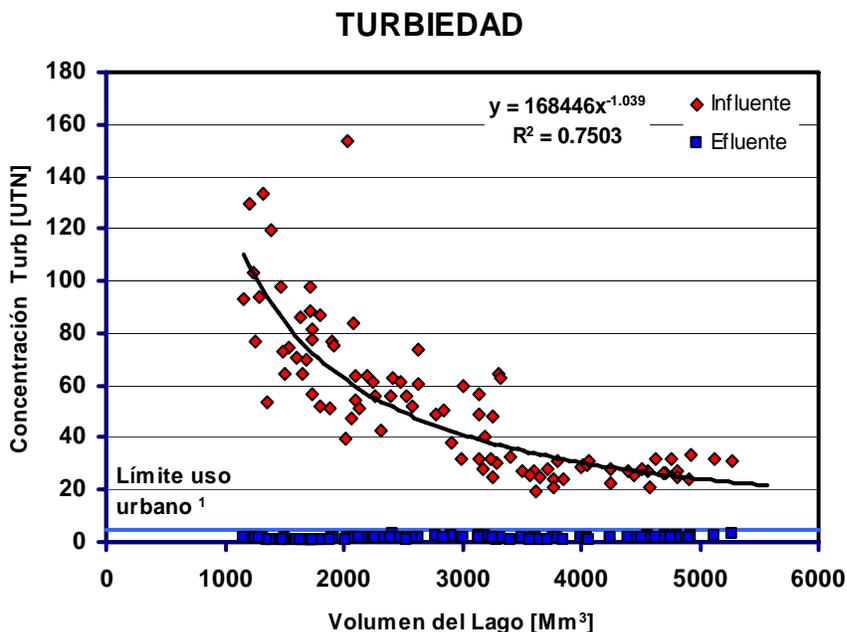


Figura 5.7 Comportamiento de turbiedad como función del volumen del lago.

<sup>1</sup> (DOF, 2000) NOM-127-SSA-1994 (5 UTN)

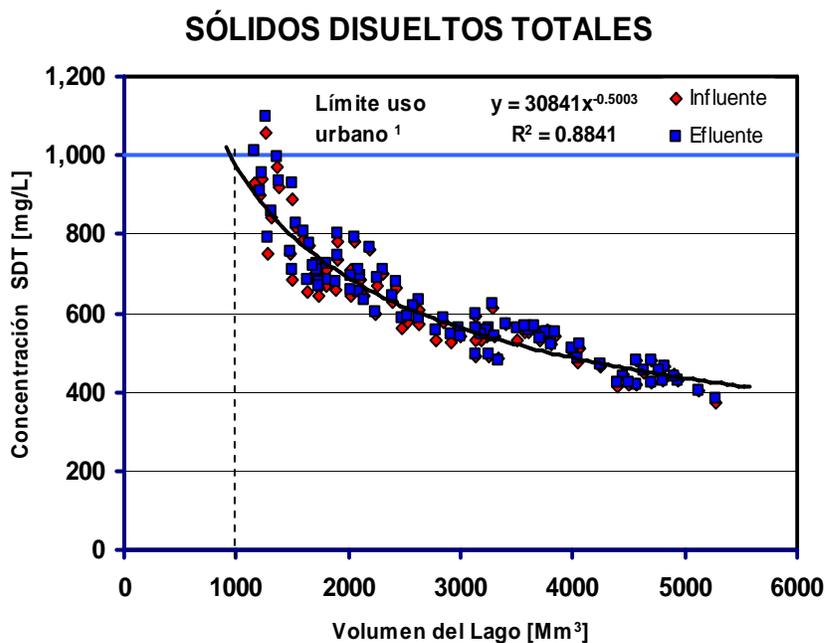


Figura 5.8 Comportamiento de SDT como función del volumen del lago.

<sup>1</sup> (DOF, 2000) NOM-127-SSA-1994 (1,000 mg/L)

Se observa que no existe una remoción de SDT con el tratamiento convencional actual y cuando el volumen del lago está en 1,000 Mm<sup>3</sup> se rebasa la concentración que establece la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Se analizaron los datos de la eficiencia del tratamiento actual para cada parámetro y se determinó que el tratamiento convencional actual reduce a niveles aceptables los siguientes parámetros: pH, Color, Turbiedad, Coliformes Fecales y Totales, independientemente del volumen que tenga el lago. Mientras que las concentraciones de Cl<sub>2</sub> residual, SAAM, O<sub>2</sub>, Al, Mn y N-NH<sub>3</sub>, en ocasiones rebasan la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000). Los parámetros que no sobrepasan la norma a cualquier volumen del lago son: Cl<sup>-</sup>, Dureza Total, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, As, Cd, Ba, Fe, Cr, Cu, Mg, Zn, N-NO<sub>2</sub>, N-NO<sub>3</sub> y Pb. Los siguientes parámetros sobrepasan los límites dependiendo del volumen del lago, así se tiene que los SDT sobrepasa su concentración cuando el volumen del lago es < 1,000 Mm<sup>3</sup>, para F<sup>-</sup> cuando el volumen está 1,500 Mm<sup>3</sup>, para Na cuando el volumen es < 1,600 Mm<sup>3</sup> y cuando el volumen del lago es < 1,800 Mm<sup>3</sup> sobrepasan las concentraciones de Alcalinidad Total. Los parámetros de calidad de agua que son medidos en el influente y efluente pero que no son regulados por la normatividad son: Dureza Ca, Dureza Mg, CE, DQO, DBO, Ca, Mg, K, N-Org, P-Ort, P-Total, NTK y Clorofila A. Las gráficas concentración – volumen de todos estos parámetros se presentan en el Anexo 3. Para remover los SDT es necesario incluir un tratamiento avanzado que puede ser: intercambio iónico, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa o electrodiálisis (Metcalf y Eddy, 1996). Además a este tren de tratamiento se incluye el tratamiento de lodos (figura 5.9).

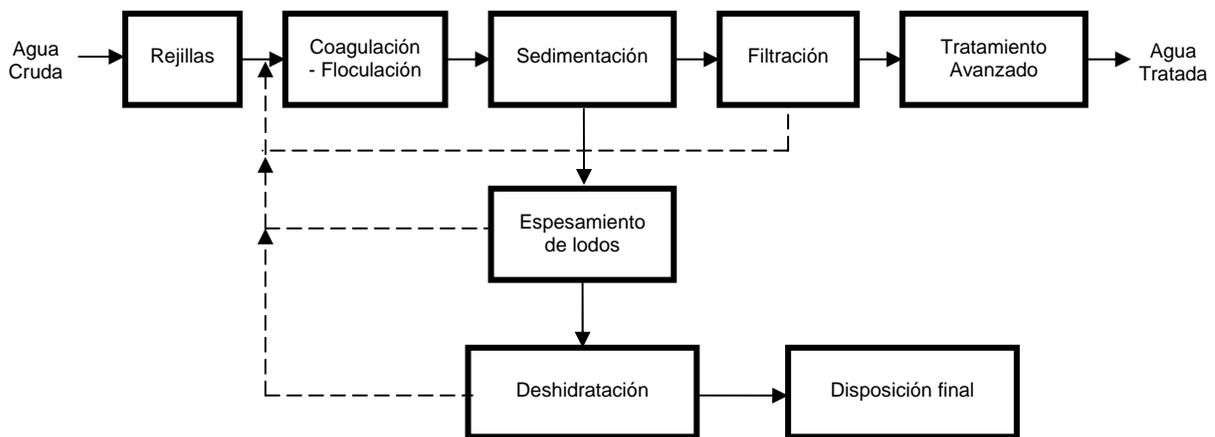


Figura 5.9 Propuesta de tren de tratamiento, agua para suministro urbano (volumen del lago 1,000 Mm<sup>3</sup>)

El tratamiento de agua cuando el volumen del lago es: 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>, el tratamiento convencional es suficiente para reducir la concentración de aquellos parámetros de calidad del agua que sobrepasan la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) para estos volúmenes del lago. Por lo que únicamente se anexa el tratamiento de lodos para cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2002 (DOF, 2002) (figura 5.10).

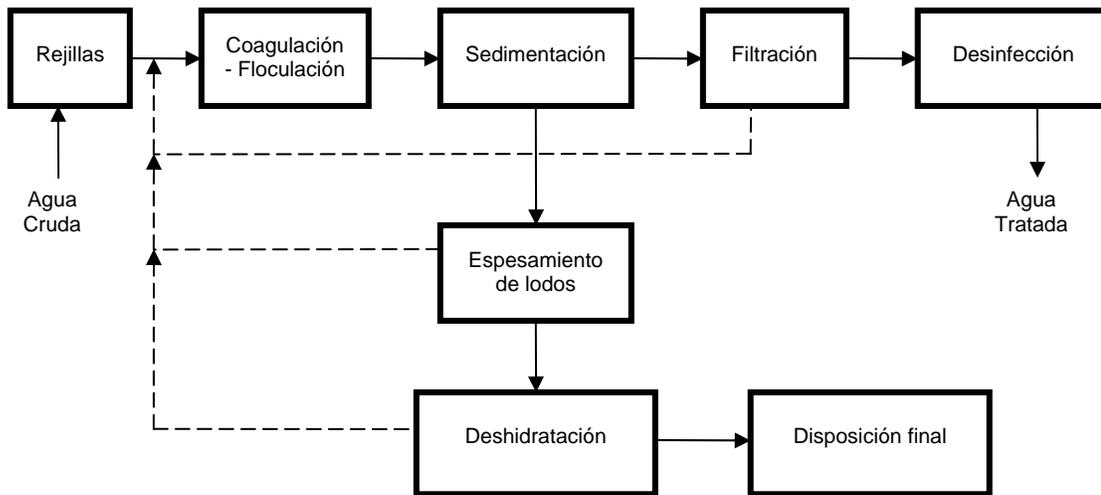


Figura 5.10 Propuesta de tren de tratamiento, agua para suministro urbano (volumen del lago 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>)

### 5.4.3 Evaluación de costos de potabilización (tratamiento actual)

El tren de tratamiento que actualmente potabiliza el agua la ciudad de Guadalajara (figura 5.11), fue evaluado con la finalidad de obtener los costos de la potabilización del agua para suministro urbano (Q = 6,014 lps) y para diferentes volúmenes del lago que se traducen en diferentes concentraciones de parámetros en el agua.

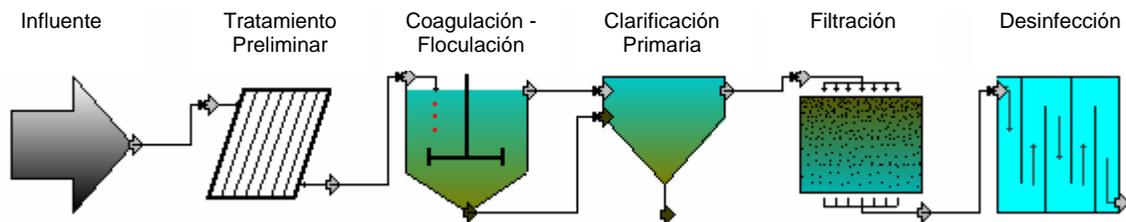


Figura 5.11 Tratamiento actual para potabilizar el agua para suministro urbano para diferentes volúmenes del lago (1,000, 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>).

Se obtuvieron los siguientes costos relacionados con el tratamiento: construcción, operación, mantenimiento, materiales, reactivos químicos, energía eléctrica y amortización, que se generan anualmente. Los costos calculados para este escenario se observan en la tabla 5.4. Se incluye también el costo total anual del tratamiento que es la suma de los costos mencionados anteriormente, así como el precio unitario del agua tratada, que es el costo total anual del tratamiento entre el volumen anual de agua tratada. Estos costos se compararán posteriormente con los costos reales de tratamiento.

Tabla 5.4 Costos de potabilización del agua con tratamiento actual, evaluados en Capdet Works.

volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]							[\$/m <sup>3</sup> ]
	Obra civil	Operación	Mant	Material	Reactivos químicos	Energía	Total	
1,000	19,100,000	4,030,000	1,450,000	2,280,000	68,700,000	32,600,000	128,160,000	0.6758
2,000	18,900,000	3,890,000	1,330,000	2,270,000	19,000,000	32,600,000	77,990,000	0.4112
3,000	18,800,000	3,780,000	1,210,000	2,270,000	9,900,000	32,600,000	68,560,000	0.3615
4,000	18,700,000	3,670,000	1,090,000	2,260,000	5,440,000	32,600,000	63,760,000	0.3362

El costo del tratamiento anual así como el costo unitario del tratamiento, se graficaron como función del volumen del lago obteniendo el siguiente resultado (figura 5.12).

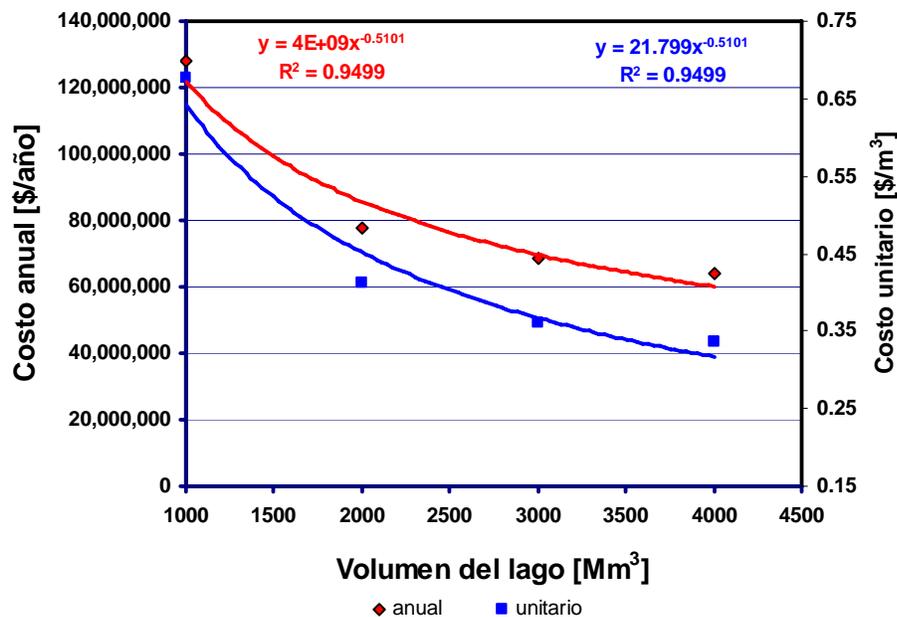


Figura 5.12 Costos de potabilización anual y por m<sup>3</sup> de agua con tratamiento actual para suministro urbano como función del volumen del lago.

Se observa que el costo del tratamiento del agua para este escenario (suministro urbano) disminuye cuando el volumen de agua en el lago aumenta. Las diferencias en el costo de tratamiento para diferentes volúmenes del lago, depende directamente de las concentraciones de los parámetros de calidad del agua a remover, es decir, entre menor sea la calidad del agua en el lago mayor será el costo del tratamiento, ya que el gasto a tratar es constante para cualquier volumen del lago.

Esta información calculada por el programa fue comparada con los costos reales de tratamiento actual para su validación. Los costos de tratamiento que se generan en las plantas potabilizadoras 1 y 2 fueron proporcionados por el Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), para diferentes periodos y diferentes volúmenes del lago. Los costos de tratamiento reales se componen de los costos anuales de operación, mantenimiento, energía eléctrica, reactivos químicos, total anual y costo unitario. Estos costos fueron llevados a valor presente utilizando el índice nacional de precios al consumidor que maneja el Banco de México, con la finalidad de poderlos comparar con los costos calculados por el programa para el año 2004. En la tabla 5.5 se muestran los diferentes costos de tratamiento para diferentes años, llevados a valor presente (2004).

**Tabla 5.5 Costos de tratamiento anual de las plantas potabilizadoras 1 y 2 SIAPA 2005.**

COSTOS	Años							
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Operación</b>	666,500	678,840	382,541	1,682,400	1,822,593	2,518,272	2,747,369	2,974,675
<b>Mantenimiento</b>	200,646	1,340,560	113,268	1,933,880	848,383	927,884	1,052,026	6,246,239
<b>Energía eléctrica</b>	18,701,734	27,909,510	31,590,144	30,574,137	31,730,855	37,305,101	37,229,869	39,454,814
<b>Reactivos químicos</b>	3,410,107	4,770,032	10,135,777	15,146,841	17,072,380	15,947,627	20,416,191	22,324,917
<b>Total de tratamiento [\$/año]</b>	22,978,987	34,698,942	42,221,730	49,337,258	51,474,211	56,698,884	61,445,455	71,000,645
<b>Costo unitario [\$/m<sup>3</sup>]</b>	0.121	0.183	0.223	0.260	0.271	0.299	0.324	0.374
<b>Volumen del lago [Mm<sup>3</sup>]</b>	4,270	3,903	3,296	2,647	2,700	2,121	1,548	2,256

Para poder realizar esta comparación se volvió a calcular el costo de tratamiento anual y unitario tomando únicamente en cuenta los costos de operación, mantenimiento, energía eléctrica y reactivos químicos (tabla 5.6). Eliminando para esta comparación los costos de obra civil y materiales.

Tabla 5.6 Costos de potabilización del agua con tratamiento actual, sin costos de obra civil y materiales evaluados en Capdet Works.

Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]					[\$/m <sup>3</sup> ]
	Operación	Mant	Reactivos químicos	Energía	Total	
1,000	4,030,000	1,450,000	68,700,000	32,600,000	106,780,000	0.5631
2,000	3,890,000	1,330,000	19,000,000	32,600,000	56,820,000	0.2996
3,000	3,780,000	1,210,000	9,900,000	32,600,000	47,490,000	0.2504
4,000	3,670,000	1,090,000	5,440,000	32,600,000	42,800,000	0.2257

El costo de tratamiento anual real y calculado en Capdet Works, fue graficado como función del volumen del lago con la finalidad de realizar una comparación gráfica (figura 5.13) y numérica de ambos costos (tabla 5.7). Con esta información se validó el programa para la simulación de los escenarios siguientes y obtener resultados confiables.

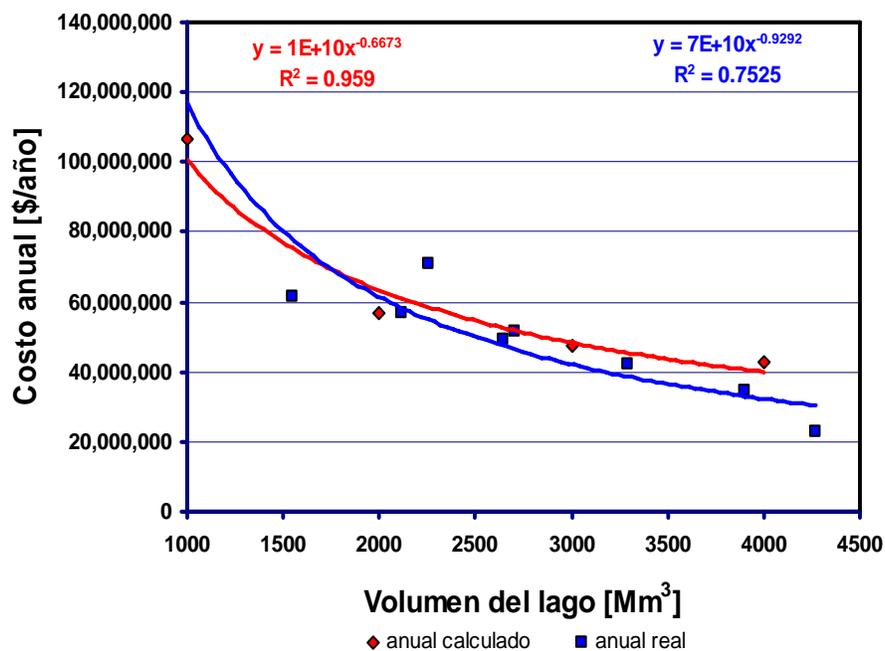


Figura 5.13 Costo anual con tratamiento actual real y calculado como función del volumen del lago.

Tabla 5.7 Costo anual de tratamiento actual: calculado y real.

Volumen del lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costo [\$/año]		
	Calculado	Real	Diferencia
1,000	99,563,464	114,155,815	-14,592,351
2,000	62,693,524	59,948,865	2,744,659
3,000	47,831,829	41,129,835	6,701,994
4,000	39,477,111	31,482,115	7,994,997

De igual manera el costo unitario real y calculado se graficó como función del volumen del lago (figura 5.14) y se compararon estos costos unitarios para diferentes volúmenes del lago (tabla 5.8).

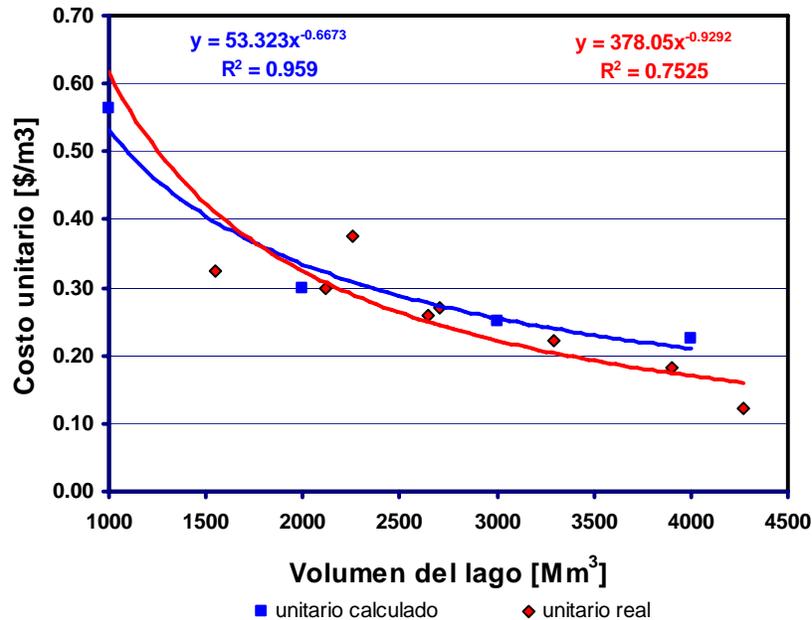


Figura 5.14 Costo unitario de tratamiento actual real y calculado como función del volumen del lago.

Tabla 5.8 Costo unitario de tratamiento actual: calculado vs real.

Volumen del lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costo [\$/año]		
	Calculado	Real	Diferencia
1,000	0.5309	0.6165	-0.0856
2,000	0.3343	0.3238	0.0105
3,000	0.2551	0.2221	0.0329
4,000	0.2105	0.1700	0.0405

Analizando los datos anteriores se observa lo siguiente:

- Se presentan buenos resultados al estimar los costos de tratamiento con el programa Capdet Works, debido a que los costos reales y calculados son similares entre sí y presentan mínima diferencia.
- Los resultados obtenidos por el programa son razonables debido a su gran similitud con los costos reales.
- Los costos calculados y reales presentan una alta relación con el volumen del lago, observando que a volúmenes bajos del lago se presentan mayores costos de tratamiento.

#### 5.4.4 Evaluación de costos de potabilización (tratamiento adicional)

El tren de tratamiento para este escenario ( $Q = 6,014$  lps) y para volúmenes de agua en el lago de 1,000 (figura 5.15), 2,000, 3,000 y 4,000  $Mm^3$  (figura 5.16), fue evaluado obteniendo los siguientes resultados. Los datos de entrada requeridos por el programa (calidad del agua, gastos, costos unitarios) para este escenario, son los correspondientes, presentados en los capítulos 4.2.1 y 5.3.

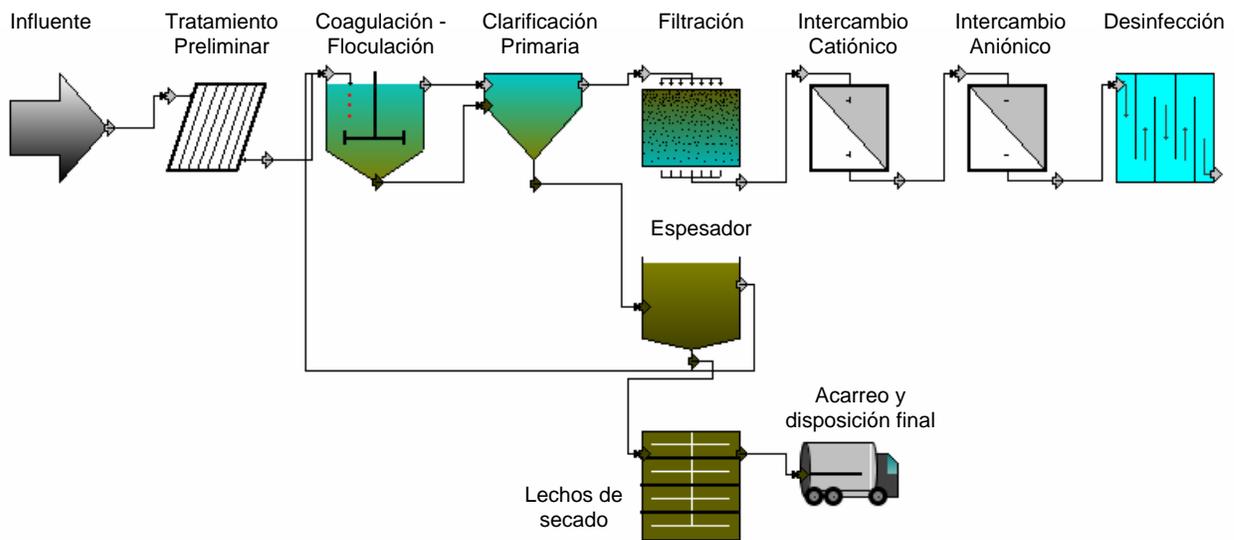


Figura 5.15 Tratamiento convencional + intercambio iónico + tratamiento de lodos para suministro urbano (volumen del lago 1,000  $Mm^3$ )

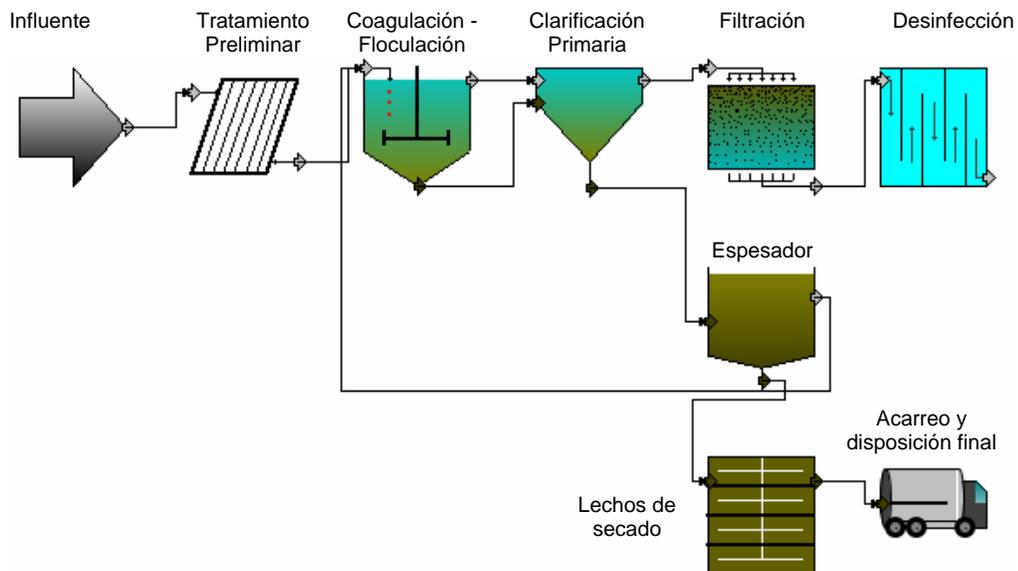


Figura 5.16 Tratamiento convencional + tratamiento de lodos para suministro urbano (2,000, 3,000 y 4,000  $Mm^3$ ).

Estos escenarios fueron evaluados, obteniendo los costos de construcción, operación, mantenimiento, materiales, reactivos químicos, energía eléctrica, así como los costo del tratamiento anual y el costo unitario del tratamiento (tabla 5.9). Estos dos últimos costos fueron graficados con el correspondiente volumen del lago obteniendo la figura 5.17. El programa toma en cuenta los costos asociados para la regeneración de la resina de intercambio iónico, sin embargo, no se propone tratamiento para la solución usada en la regeneración.

Tabla 5.9 Costos de potabilización del agua con tratamiento convencional actual con y sin intercambio iónico y adicionando tratamiento de lodos, evaluados en Capdet Works.

Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]							[\$/m <sup>3</sup> ]
	Obra civil	Operación	Mant	Material	Reactivos químicos	Energía	Total	
1,000	33,100,000	7,270,000	18,400,000	2,650,000	68,700,000	32,800,000	162,920,000	0.8591
2,000	20,700,000	5,340,000	2,080,000	2,450,000	19,000,000	32,700,000	82,270,000	0.4338
3,000	19,900,000	4,730,000	1,690,000	2,390,000	9,900,000	32,700,000	71,310,000	0.3760
4,000	19,900,000	4,570,000	1,810,000	2,370,000	5,440,000	32,700,000	66,790,000	0.3522

Se observa que hay un aumento significativo en el costo del tratamiento del agua cuando el volumen del lago está en 1,000 Mm<sup>3</sup>. Este aumento refleja el costo de tratamiento adicional para la eliminación de SDT con intercambio iónico.

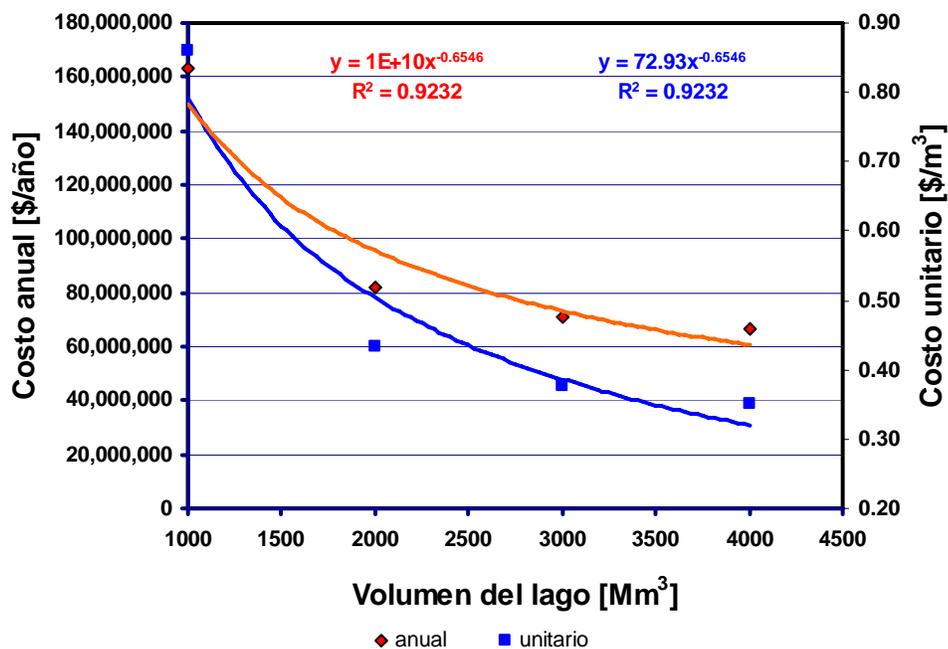


Figura 5.17 Costos de potabilización anual y por m<sup>3</sup> de agua con intercambio iónico y tratamiento de lodos para suministro urbano como función del volumen del lago.

## 5.5 Evaluación de costos de tratamiento para riego agrícola

A continuación se muestran los trenes de tratamiento propuestos para la estimación de costos de tratamiento para uso agrícola.

### 5.5.1 Problemática

Actualmente el agua que se extrae del Lago de Chapala destinado a la agricultura no recibe ningún tratamiento. Sin embargo, como se observó en el capítulo 4, existen parámetros que sobrepasan los límites establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) para utilizar el agua para uso agrícola y evitar que se generen problemas relacionado con la salinización de los suelos como se presentó anteriormente. Se propone un tratamiento convencional seguido de un tratamiento avanzado para la eliminación de SDT y se adiciona el tratamiento de lodos (figura 5.18).

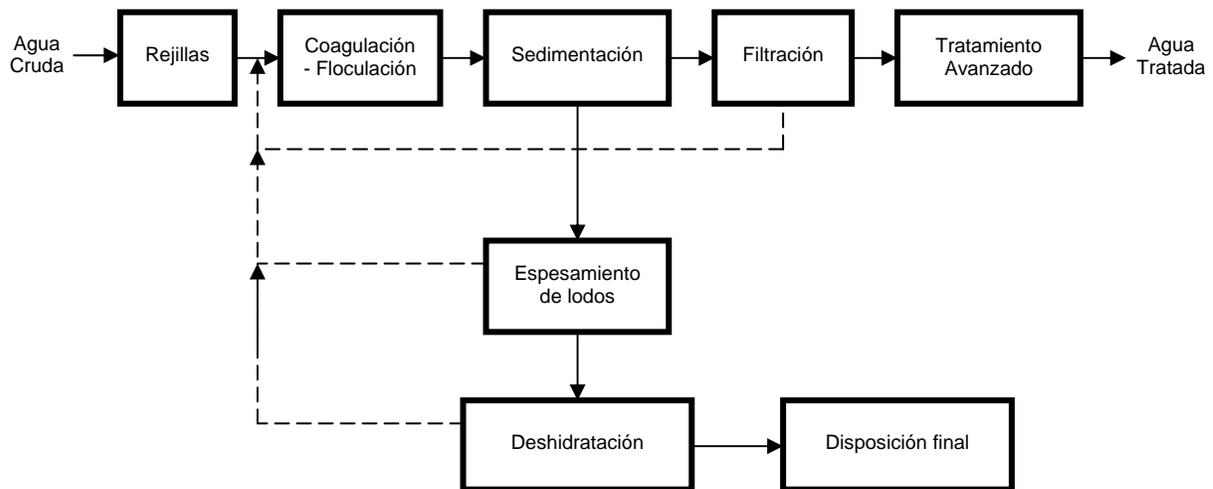


Figura 5.18 Propuesta de tren de tratamiento agua para uso agrícola (volumen del lago 2,000, 3,000 y 4,000 Mm<sup>3</sup>).

### 5.5.2 Valor económico del agua del Lago de Chapala para riego

El tren de tratamiento para uso agrícola (figura 5.19) fue evaluado individualmente para cada módulo de extracción de agua para uso agrícola. Por lo que se determinaron los costos de tratamiento para los módulos: La Palma, El Fuerte y Ejido Modelo. Los datos de entrada requeridos por el programa (calidad del agua, gastos, costos unitarios) para estos escenarios son los correspondientes, presentados en los capítulos 4.2.2 y 5.3.

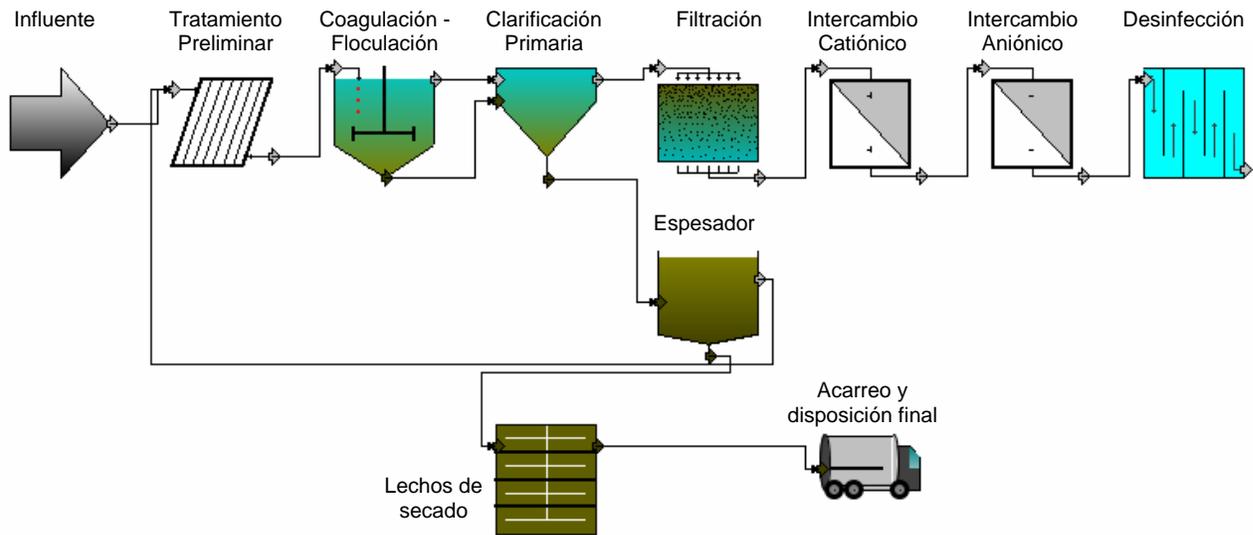


Figura 5.19 Tratamiento de agua para uso agrícola para diferentes volúmenes del lago.

Los resultados de este análisis se observan en las tablas 5.10, 5.11 y 5.12.

Tabla 5.10 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo La Palma, evaluados con Capdet Works.

Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]							[\$/m <sup>3</sup> ]
	Obra civil	Operación	Mant	Material	Reactivos químicos	Energía	Total	
2000	2,960,000	924,000	2,160,000	280,000	1,240,000	4,450,000	12,014,000	3.638
3000	7,180,000	1,970,000	4,620,000	624,000	1,620,000	8,130,000	24,144,000	1.404
4000	10,900,000	1,900,000	6,780,000	897,000	1,780,000	12,700,000	34,957,000	1.124

Tabla 5.11 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo El Fuerte, evaluados con Capdet Works.

Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]							[\$/m <sup>3</sup> ]
	Obra civil	Operación	Mant	Material	Reactivos químicos	Energía	Total	
2000	632,000	546,000	591,000	86,800	207,000	2,210,000	4,272,800	3.708
3000	1,650,000	698,000	1,370,000	168,000	362,000	3,210,000	7,458,000	1.936
4000	2,890,000	857,000	2,130,000	274,000	397,000	4,440,000	10,988,000	1.677

Tabla 5.12 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo Modelo, evaluados con Capdet Works.

Volumen lago [Mm <sup>3</sup> ]	Costos [\$/año]							[\$/m <sup>3</sup> ]
	Obra civil	Operación	Mant	Material	Reactivos químicos	Energía	Total	
2000	224,000	425,000	183,000	54,600	25,500	1,730,000	2,642,100	18.463
3000	400,000	482,000	363,000	72,100	50,500	1,940,000	3,307,600	6.090
4000	549,000	519,000	516,000	81,200	54,300	2,120,000	3,839,500	4.071

En la tabla 5.12 se observa que el costo de tratamiento de agua para el Módulo Modelo es mayor al calculado para el Módulo El Fuerte y La Palma, debido a que el programa es sensible a un gasto tan pequeño, utilizado para el Módulo Modelo.

Los costos anuales y el costo unitario del tratamiento fueron graficados como función del volumen del lago. Los resultados de este análisis se presentan para cada módulo en las figuras 5.20, 5.21 y 5.22. Se observa que el costo de tratamiento anual (\$/año) para este uso es mayor cuando aumenta el volumen del lago, esto es debido, a que la extracción de agua (gasto a tratar) para este uso se incrementa con los volúmenes del lago, lo que no ocurre para suministro urbano que los volúmenes de extracción son casi constantes independientemente del volumen del lago. Al convertir este costo anual a costo por m<sup>3</sup> de agua tratada se observa que la tendencia se invierte, siendo más elevado este costo a volúmenes bajos del lago.

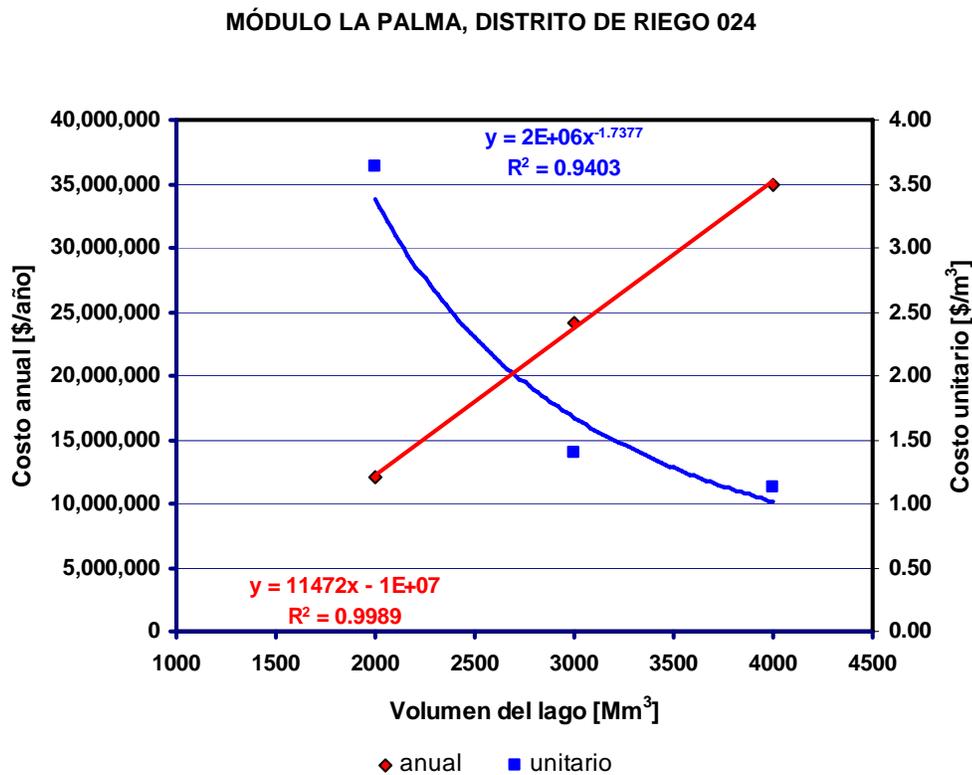


Figura 5.20 Costos de tratamiento anual y por m<sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo La Palma como función del volumen del lago.

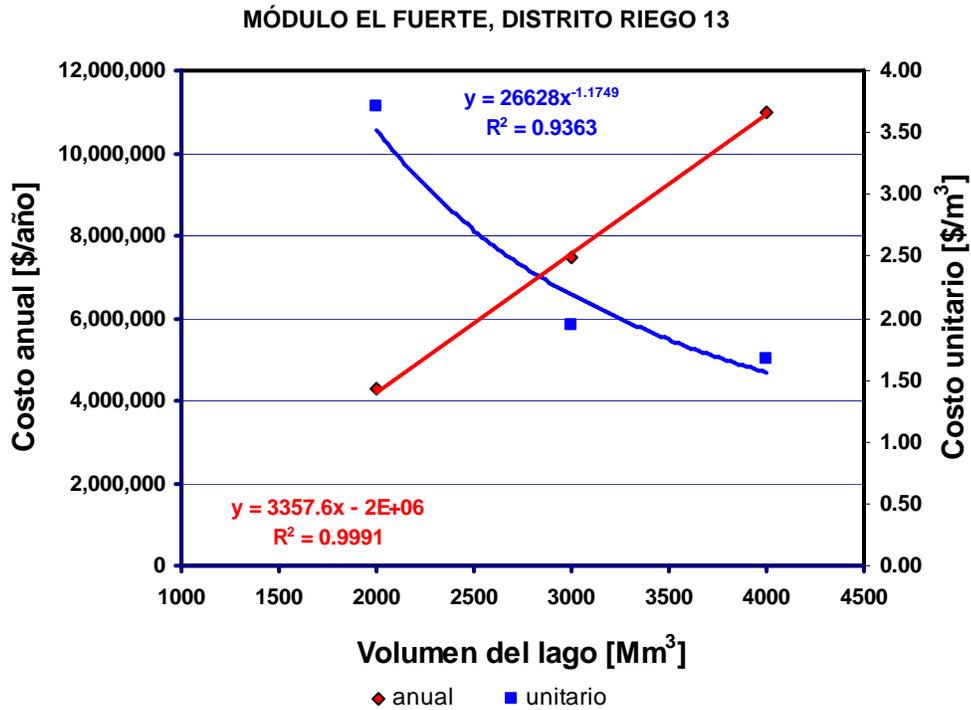


Figura 5.21 Costos de tratamiento anual y por m<sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo El Fuerte como función del volumen del lago.

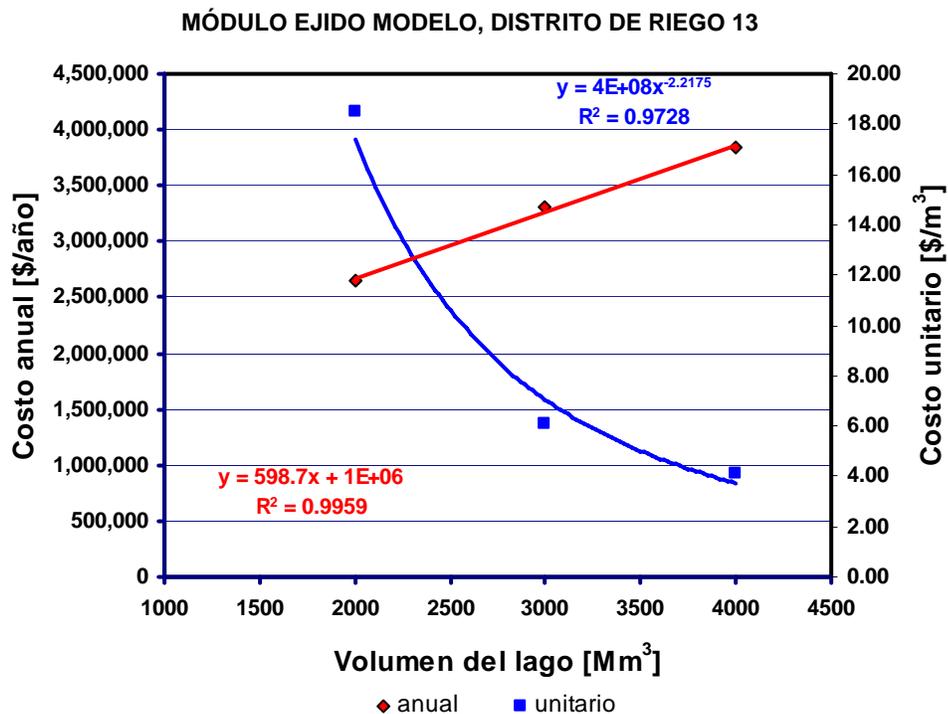


Figura 5.22 Costos de tratamiento anual y por m<sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo Ejido Modelo como función del volumen del lago.

## 6 CONCLUSIONES

Se determinaron las necesidades de tratamiento de agua del Lago de Chapala para suministro urbano y uso agrícola, y se calcularon los costos de tratamiento de agua para estos usos y diferentes volúmenes de agua en el lago. Con base en los resultados obtenidos en esta tesis, se prueba cuantitativamente que las necesidades y en consecuencia los costos de tratamiento de agua para los usos anteriores, aumentan cuando disminuyen los volúmenes de agua en el Lago de Chapala. Asimismo, estos resultados son necesarios y se integrarán al proyecto SEMARNAT - CONACYT (2003), “El Lago de Chapala y su entorno eco-social. Desarrollo de una matriz de costos ecológicos para el análisis de políticas ambientales” (SEMARNAT-2002-C01-0087), el cual ayudará a tomar decisiones sustentables para la conservación del Lago de Chapala.

El agua del Lago de Chapala es utilizada para suministro urbano para la ciudad de Guadalajara y por los distritos de riego 013 y 024 para uso agrícola; esta agua es extraída directamente del lago mediante 4 módulos de extracción localizados en las orillas del lago. No se encontraron extracciones de agua en el lago para industria ni piscicultura. El volumen extraído para Guadalajara es de  $190 \pm 23 \text{ Mm}^3/\text{año}$  independientemente del volumen de agua en el lago, mientras que para la asignación de agua para riego depende del volumen de agua en el lago, siendo ésta restringida (cero) para volúmenes menores a  $2,000 \text{ Mm}^3$ .

A través del análisis estadístico de resultados de monitoreo de calidad del agua realizado por la CNA desde 1974 a 2001, se obtuvieron las ecuaciones que relacionan 32 parámetros con el volumen de agua en lago.

Con base en lo anterior, se definieron los volúmenes mínimos de agua en el lago donde se cumple con las normas y/o criterios ecológicos para diferentes usos. Esta información permitió definir las necesidades de tratamiento de agua en el lago para diferentes usos. De esta manera se observó que cuando el volumen de agua en el lago es inferior a  $4,625 \text{ Mm}^3$ , es necesario reducir la concentración de sólidos disueltos totales para uso en riego agrícola, mientras que para suministro urbano esta reducción es requerida a partir de

volúmenes de 1,579 Mm<sup>3</sup>. De igual forma, se definieron los volúmenes mínimos para cumplir con la normatividad para Sólidos Suspendidos Totales, Sulfatos y Conductividad Eléctrica cuando el agua es destinada a riego agrícola y para Sólidos Totales, pH, Alcalinidad Total y Nitrógeno Amoniacal para suministro urbano.

De acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989), para cualquier volumen del lago, se requiere reducir las concentraciones de Grasas y Aceites, Turbiedad, Color, Coliformes Totales y Fecales para suministro urbano; de Coliformes Fecales para riego agrícola y de Turbiedad, Sulfatos y Coliformes Fecales para protección de la vida acuática.

Mediante uso del software Capdet Works, se definieron varios escenarios de tratamientos y sus respectivos costos. Para el tratamiento actual (cribado, coagulación - floculación, sedimentación, filtración y desinfección) el costo de tratamiento va de \$63,760,000.00/año a \$128,160,000.00/año y el costo unitario, de \$0.33/m<sup>3</sup> a \$0.67/m<sup>3</sup>, para volúmenes del lago de 4,000 a 1,000 Mm<sup>3</sup> respectivamente. Es decir, que es más costoso tratar el agua cuando el volumen de agua en el lago es bajo que cuando es alto, siendo este aumento de más de 100%. Excluyendo el costo por obra civil y materiales, estos costos fueron validados con los costos reales de potabilización en las dos plantas existentes, obteniendo números muy similares para los diferentes volúmenes del lago.

La inclusión de intercambio iónico para disminuir los sólidos disueltos para suministro urbano, cuando el volumen del lago es menor a 1,579 Mm<sup>3</sup>, aumenta el costo de tratamiento a \$0.85/m<sup>3</sup>.

Dado que el límite establecido en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989) referente a los Sólidos Disueltos Totales, para uso en riego agrícola es inferior al límite establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) para suministro urbano, el costo de tratamiento para este primero aumenta drásticamente cuando el volumen del lago es menor a 2,000 Mm<sup>3</sup> (\$3.67/m<sup>3</sup> para volúmenes de agua en el lago de 4,000 Mm<sup>3</sup> a \$8.60/m<sup>3</sup> para 2,000 Mm<sup>3</sup>, valor promedio de los tres módulos).

## RECOMENDACIONES

Entre las acciones necesarias para proteger la calidad del agua en el Lago de Chapala, debe contemplarse el aumento de su volumen. Los costos de tratamiento de agua para riego agrícola y suministro urbano, representan costos ambientales que se generan debido a las variaciones de agua en el lago. Estos costos permiten asignar un valor económico al Lago de Chapala y sirven para tomar decisiones dirigidas a preservar este importante ecosistema.

Con la finalidad de mejorar la información que permite tomar decisiones en cuanto al uso sustentable de agua del Lago de Chapala, se recomienda evaluar los costos de pérdida de suelos, costos de rehabilitación de suelos salinos y costos de cambio de cultivos como consecuencia de uso de agua con elevada salinidad y para conocer el efecto económico a largo plazo, se deberá comparar estos costos con los de tratamiento de agua para riego agrícola y con la producción en la agricultura de la región.

## ANEXO 1. Calidad del agua para diferentes usos

PARÁMETROS	USOS						
	NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000)	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989)					
UNIDADES EN mg/LSI NO SE INDICAN OTRAS	SUMINISTRO URBANO	SUMINISTRO URBANO	RECREATIVO CON CONTACTO DIRECTO	RIEGO AGRÍCOLA	PECUARIO	VIDA ACUÁTICA (AGUA DULCE)	VIDA ACUÁTICA (AGUAS COSTERAS)
<b>PARÁMETROS INORGÁNICOS</b>							
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )		400				(I)	(I)
Aluminio	0.2	0.02		5	5	0.05	0.2
Antimonio		0.1		0.1		0.09	
Arsénico	0.05	0.05		0.1	0.2	0.2	0.04
Asbestos (Fibras/L)		3000					
Bario	0.7	1				0.01	0.5
Berilio		0.00007		(III)	0.1	0.001	
Boro		1		0.70 (V)	5		0.009
Cadmio	0.005	0.01		0.01	0.02	(VI)	0.0009
Cianuro (como CN <sup>-</sup> )	0.07	0.02	0.02	0.02		0.005	0.001
Cloro Residual Libre	0.20 - 1.50					0.011	0.0075
Cloruros (como Cl)	250	250		147.5		250	
Cobre	2	1		0.2	0.5	(VII)	0.003
Cromo Total	0.05	0.05		1	1	0.01	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500						
Fierro	0.3	0.3		5		1	0.05
Fluoruros (como F)	1.5	1.5		1	2	1	0.5
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		0.1				(IX)	0.002
Fósforo Elemental						0.0001	0.0001
Manganeso	0.15	0.1					
Mercurio	0.001	0.001			0.003	0.00001	0.00002
Níquel		0.01		0.2	1	(X)	0.008
Nitratos (NO <sub>3</sub> como N)	10	5			90		0.04
Nitritos (NO <sub>2</sub> como N)	0.05	0.05			10		0.002
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5					0.06	0.01
Oxígeno Disuelto (XI)		4				5	5
Plata		0.05				(XIV)	0.002
Plomo	0.025	0.05		5	0.1	(XV)	0.006
Selenio (como Selenato)		0.01		0.02	0.05	0.008	0.4
Sodio	200						
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	400	500		130		0.005	
Sulfuros (como H <sub>2</sub> S)		0.2				0.002	0.002
Talio		0.01				0.01	0.02
Yodo Residual Libre	0.20 - 0.50						
Zinc	5	5		2	50	(XVII)	0.09
<b>PARÁMETROS ORGÁNICOS</b>							
Acenafteno		0.02				0.02	0.01
Ácido 2,4 Diclorofenoxiacético		0.1					
Acilonitrilo		0.0006				0.07	
Acroleína		0.3		0.1		0.0007	0.0005

Aldrin	0.00003	0.0003	0.00005	0.02		0.003	0.001
Benceno	0.01	0.01				0.05	0.005
Bencidina		0.000001				0.02	
Bifenilos Policromados		0.0000008				0.00001	0.00003
BHC (IV)						0.001	0.000003
BHC (Lindano)		0.003				0.002	0.0002
Bis (2-Cloroetil)Éter		0.0003				0.00238	
Bis (2-Cloroisopropil)Éter		0.03				0.00238	
Bis (2-Etilhexil)Ftalato		0.032		0		0.0094	0.02944
4-Bromofenil-Fenil-Éter						0.01	
Bromoformo		0.002					
Bromuro de Metilo		0.002					
Carbono Orgánico: Extractable en Alcohol		1.5					
Carbono Orgánico: Extractable en Cloroformo		3					
Clordano (Mezcla Técnica de Metabolismos)	0.0002	0.003	0.00002	0.003		0.002	0.00009
Clorobenceno		0.02				0.0025	0.0016
2-Cloroetil-Vinil-Éter						0.5	
2-Clorofenol		0.03				0.04	0.1
Cloroformo		0.03				0.3	
CloroNaftalenos						0.02	0.00007
Cloruro de Metileno		0.002					
Cloruro de Metilo		0.002					
Cloruro de Vinilo		0.02					
DDD=Diclorofenildicloroetano		0.0000002				0.000006	0.00004
DDE=1,1 Di (Clorofenil)-2,2 Dicloroetileno				0.04		0.01	0.0001
DTT=1,1 Di (Clorofenil)-2,2,2 Tricloroetano	0.001	0.001	0.000005			0.001	0.0001
Diclorobencenos		0.4				0.01	0.02
1,2 Dicloroetano		0.005				1.2	1.1
1,1 Dicloroetileno		0.0003				0.116	2.24
1,2 Dicloroetileno		0.0003				0.116	2.24
2,4 Diclorofenol	0.03	0.03				0.02	
1,2 Dicloropropano						0.2	0.1
1,2 Dicloropropileno		0.09				0.06	0.008
Dieldrin	0.03	0.0000007	0.000003	0.02		0.002	0.0007
Dietilftalato		350				0.0094	0.02944
1,2 Difenilhidracina		0.0004				0.003	
2,4 Dimetilfenol		0.4				0.02	
Dimetilftalano		313				0.0094	0.02944
2,4 Dinitrofenol		0.07				0.002	0.05
Dinitro-o-Cresol		0.01					0.01
2,4 Dinitrotolueno		0.001				0.0033	0.0059
2,6 Dinitrotolueno						0.0033	0.0059
Endosulfan (Alfa y Beta)		0.07				0.0002	0.00003
Endrin		0.001	0.000002			0.00002	0.00004
Etilbenceno		1.4					0.5
Fenol	0.3	0.3	0.001			0.1	0.06
Fluoranteno		0.04				0.04	0.0004

Gamma-HCH (lindano)	0.002						
Gases Disueltos						(XVIII)	(XVIII)
Halometanos		0.002				0.1	
Heptacloro	0.00003	0.0001	0.000002	0.02		0.0005	0.0005
Hexaclorobenceno	0.00001	0.00001				0.0025	0.0016
Hexaclorobutadieno		0.004				0.0009	0.0003
Hexaclorociclopentadieno		0.001				0.00007	0.00007
Hexacloroetano		0.02				0.01	0.009
Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares		0.00003					0.1
Isofurona		5.2				1.2	0.1
Metoxicloro	0.02	0.03					
Naftaleto						0.02	0.02
Nitrobenceno		20				0.3	0.07
2-Nitrofenol y 4-Nitrofenol		0.07				0.002	0.05
N-Nitrosodifenilamina		0.05				0.0585	33
N-Nitrosodimetilamina		0.00001				0.0585	33
N-Nitrosodi-N-Propilamina						0.0585	33
Paration		0.00003				0.00004	0.00004
Pentaclorofenol		0.03				0.0005	0.0005
Sustancias Activas al Azul de Metileno	0.5	0.5				0.1	0.1
2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-P-Dioxina		1.00E-10				1.00E-08	1.00E-08
1,1,2,2 Tetracloroetano		0.002				0.09	0.09
Tetracloroetileno		0.008				0.05	0.1
Tetracloruro de Carbono		0.004				0.3	0.5
Tolueno	0.7	14.3				0.2	0.06
Toxafeno		0.000007	0.00003	0.005		0.0000002	0.0000002
Trihalometanos totales	0.2						
1,1,1 Tricloroetano		18.4				0.2	0.3
1,1,2 Tricloroetano		0.006				0.2	
Tricloroetileno		0.03				0.01	0.02
2,4,6 Triclorofenol		0.01				0.01	
Xileno (tres isómeros)	0.5						
<b>PARÁMETROS FÍSICOS</b>							
Aspectos Estéticos		(II)	(II)	(II)	(II)	(II)	(II)
Color (unidades de escala Pt-Co)	20	75				(VII)	(VII)
Conductividad Eléctrica (umhos/cm)				1			
Grasas y Aceites		Ausente					
Materia Flotante		(II;2)	(II;2)	(II;2)	(II;2)	(II;2)	(II;2)
Olor	Agradable	Ausente					
Potencial Hidrógeno (pH)	6.5-8.5	05-Sep		4.5 - 9.0		(XIII)	(XIII)
Sabor		Característico					
Sólidos Disueltos Totales	1000	500		500.00 (XVI)	1000		
Sólidos Suspendidos Totales		500		50		(VIII)	(VIII)
Sólidos Totales		1000					
Temperatura (°C)		CN + 2.5				CN + 1.5	CN + 1.5
Turbiedad UTN	5	Condic. Nat.				(VIII)	(VIII)
<b>PARÁMETROS BIOLÓGICOS</b>							

Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Ausencia o no detectables	1000 (XIX)	200	1000		200	200
Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Ausencia o no detectables						
<b>PARÁMETROS RADIOLÓGICOS</b>							
Alfa Total (Bq/L)	0.56	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Beta Total (Bq/L)	1.85	1	1	1	1	1	1

- I. La alcalinidad natural no debe reducirse en más del 25%, ni cuando ésta sea igual o menor a 20 mg/L.
- II. El cuerpo de agua debe estar libre de sustancias que:
  1. Formen depósitos que cambien adversamente las características físicas del agua.
  2. Contengan materia flotante que den apariencia desagradable.
  3. Produzcan olor, sabor o turbiedad.
  4. Propicien la vida acuática indeseable o desagradable.
- III. Para riego continuo, un máximo de 0.1 mg/L y para suelos alcalinos y de textura fina, un máximo de 0.5 mg/L.
- IV. Los datos para BHC involucran la mezcla de isómeros alfa, beta y épsilon.
- V. Cultivos sensibles al boro, un máximo de 0.75 mg/L; otros hasta 3 mg/L.
- VI. La concentración promedio de cadmio de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico en la siguiente ecuación:  $\text{Cd } (\mu\text{g/L}) = e^{[0.7852 (\ln \text{dureza}) - 3.490]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- VII. La concentración promedio de cobre de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico en la siguiente ecuación:  $\text{Cu } (\mu\text{g/L}) = e^{[0.8545 (\ln \text{dureza}) - 1.46]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- VIII. Los sólidos suspendidos en combinación con el color, no deben reducir la profundidad del nivel de compensación de la luz para la actividad fotosintética en más de 10 % a partir del valor natural.
- IX. En efluentes de los embalses el fósforo no debe exceder de 0.05 mg/L, dentro del embalse menor a 0.0059 mg/L y para ríos hasta 0.1 mg/L.
- X. La concentración promedio de níquel de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico en la siguiente ecuación:  $\text{Ni } (\mu\text{g/L}) = e^{[0.8460 (\ln \text{dureza}) + 1.1645]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- XI. Valores mínimos admisibles.
- XII. Valores mínimos y máximos.
- XIII. No podrá haber variaciones mayores a 0.2 unidades de pH tomando como base el valor natural estacional.
- XIV. La concentración de plata en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder el valor numérico dado por la siguiente ecuación:  $\text{Ag } (\mu\text{g/L}) = e^{[1.72 (\ln \text{dureza}) + 6.52]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- XV. La concentración promedio de plomo de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico en la siguiente ecuación:  $\text{Pb } (\mu\text{g/L}) = e^{[0.1.273 (\ln \text{dureza}) + 4.705]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- XVI. Cultivos sensibles 500 - 1000 mg/L.  
Cultivo con manejo especial 1000 - 2000 mg/L.  
Cultivos tolerantes en suelos permeables 2000 - 5000 mg/L.  
Para frutas sensibles relación de absorción de sodio (RAS) < 4, y para forrajes de 8 - 18.
- XVII. La concentración promedio de zinc de 4 días en  $\mu\text{g/L}$  no debe exceder más de una vez cada 3 años el valor numérico en la siguiente ecuación:  $\text{Zn } (\mu\text{g/L}) = e^{[0.8473 (\ln \text{dureza}) + 10.3604]} \text{ dureza} = \text{mg/L como CaCO}_3$ .
- XVIII. La concentración total de gases disueltos no debe exceder a 1.1 veces el valor de saturación en las condiciones hidrostáticas y atmosféricas prevalecientes.
- XIX. Con tratamiento convencional (coagulación, filtración y desinfección).

NMP = número más probable.

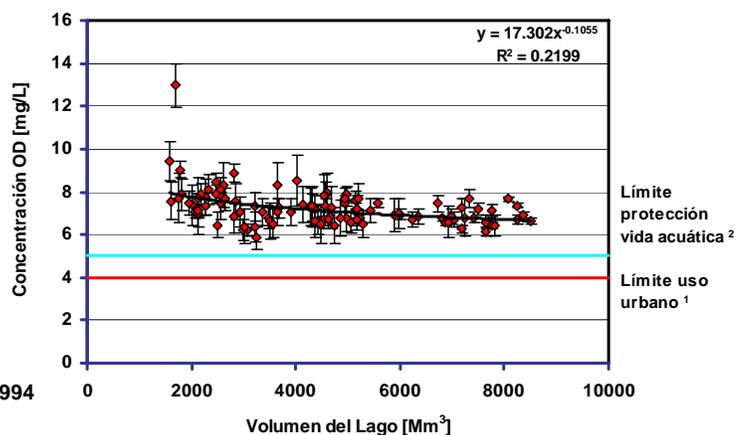
Bq = Bécquer

BHC = HCH = 1,2,3,4,5,6, Hexaclorociclohexano.

Niveles Máximos en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

## ANEXO 2. Calidad del agua como función del volumen del Lago de Chapala

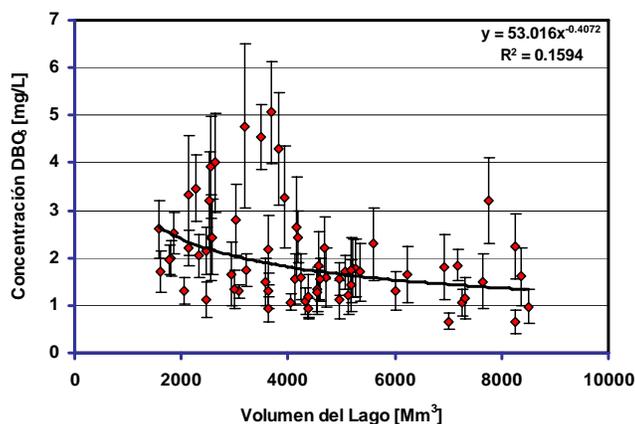
### OXÍGENO DISUELTO



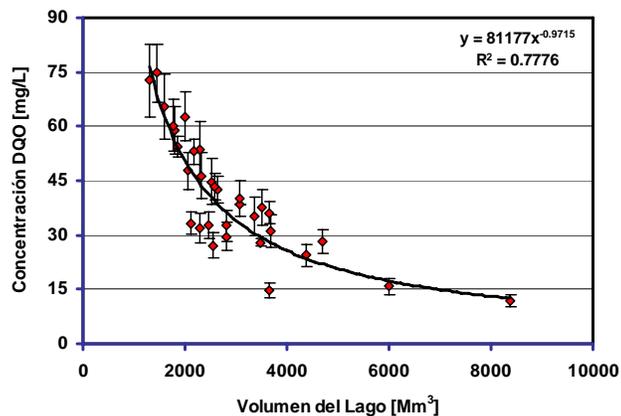
<sup>1</sup> (DOF, 2000) NOM-127-SSA-1994

<sup>2</sup> (DOF, 1989) CE-CCA-001/89

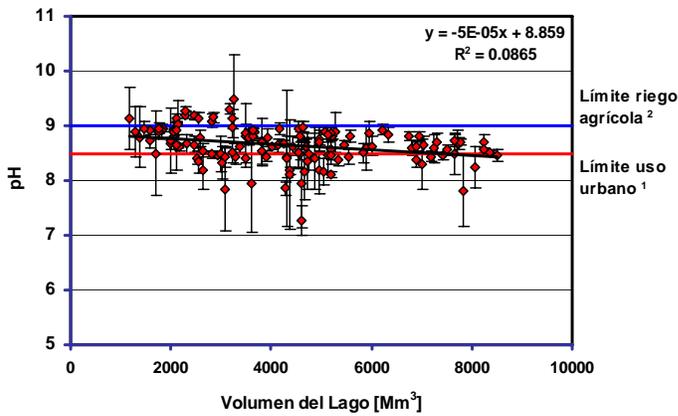
### DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO



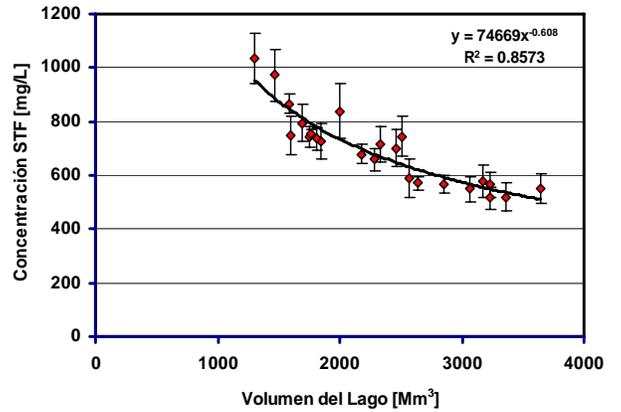
### DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO



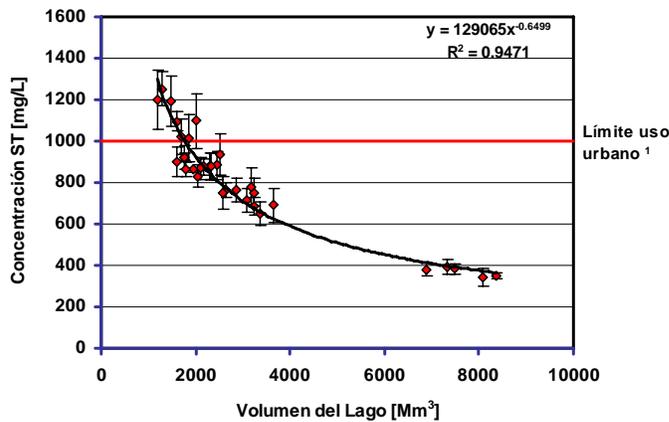
POTENCIAL DE HIDRÓGENO



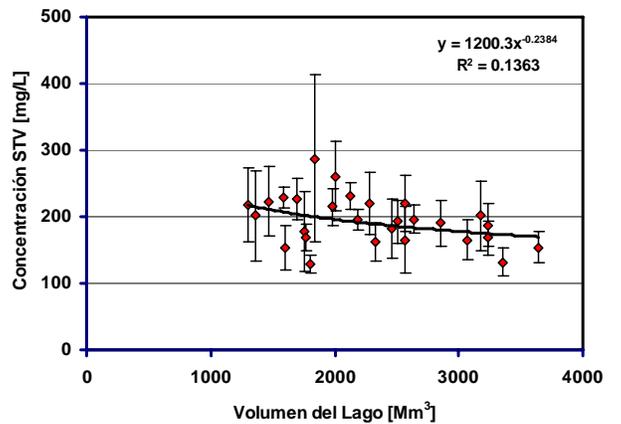
SÓLIDOS TOTALES FIJOS



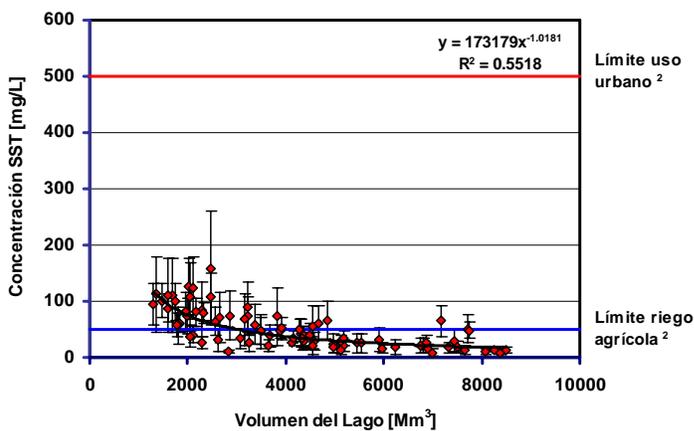
SÓLIDOS TOTALES



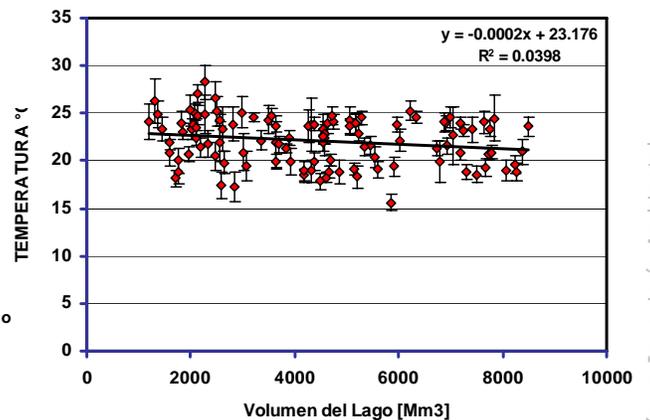
SÓLIDOS TOTALES VOLÁTILES



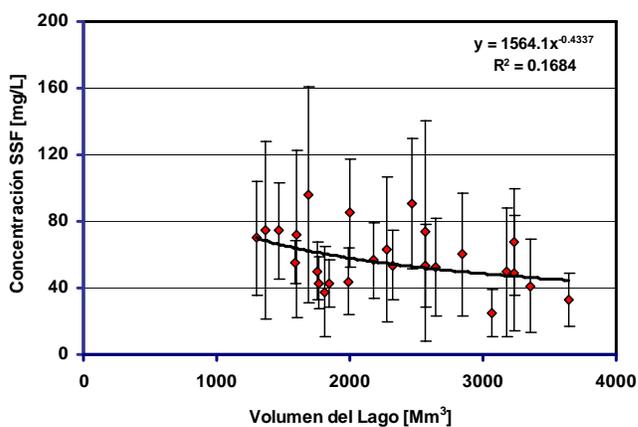
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES



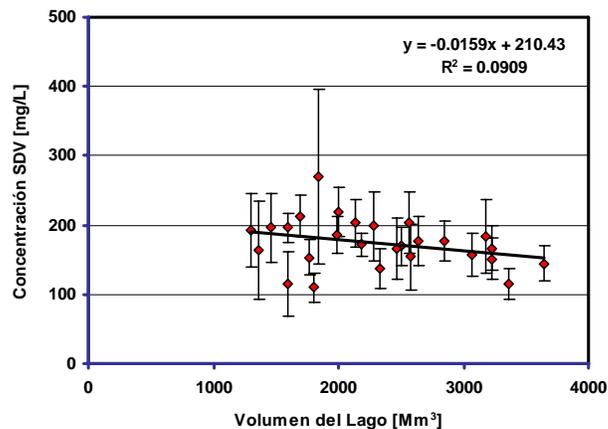
TEMPERATURA



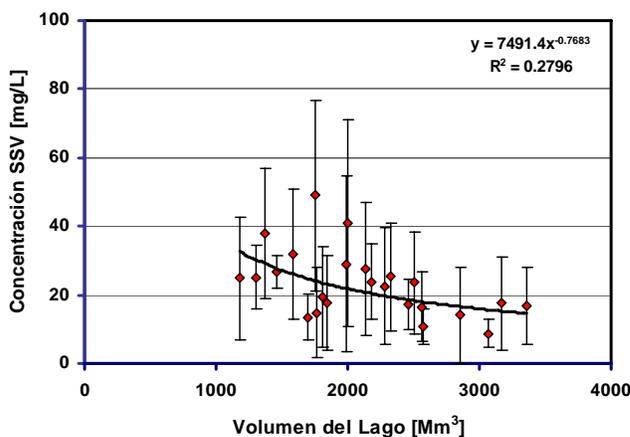
**SÓLIDOS SUSPENDIDOS FIJOS**



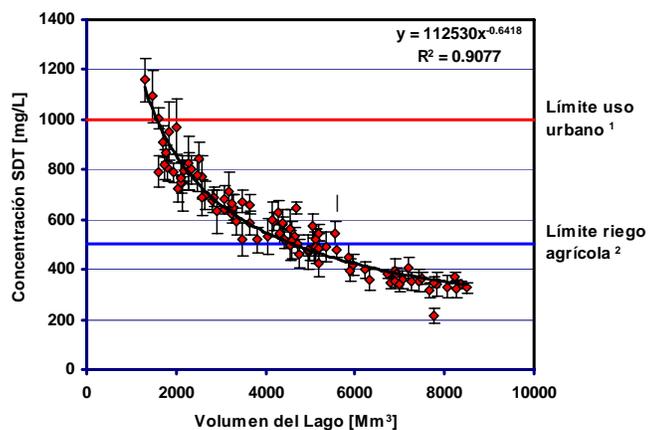
**SÓLIDOS DISUELTOS VOLÁTILES**



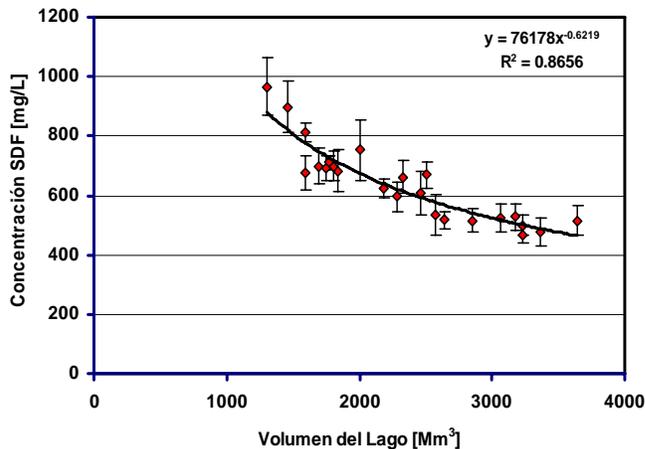
**SÓLIDOS SUSPENDIDOS VOLÁTILES**



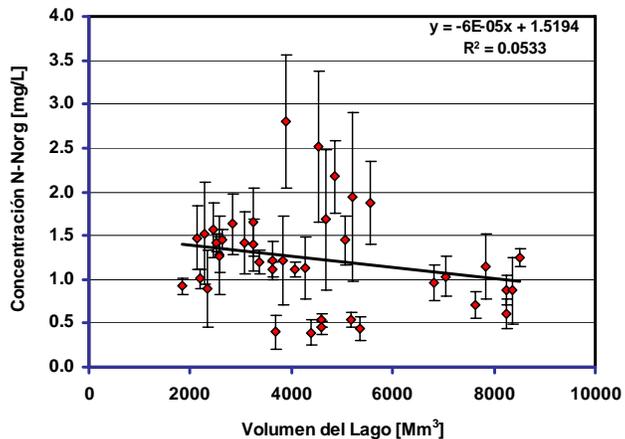
**SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES**



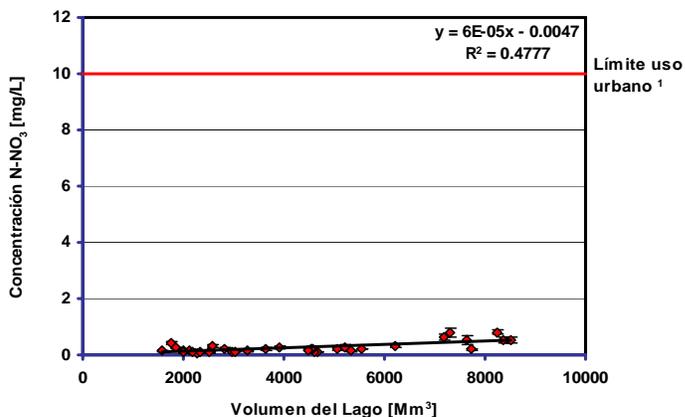
**SÓLIDOS DISUELTOS FIJOS**



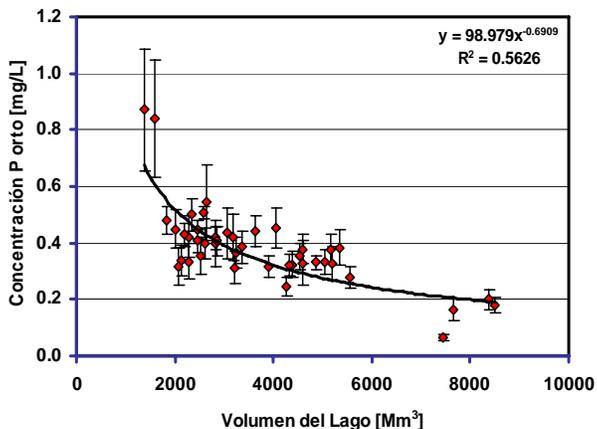
**NITRÓGENO ORGÁNICO**



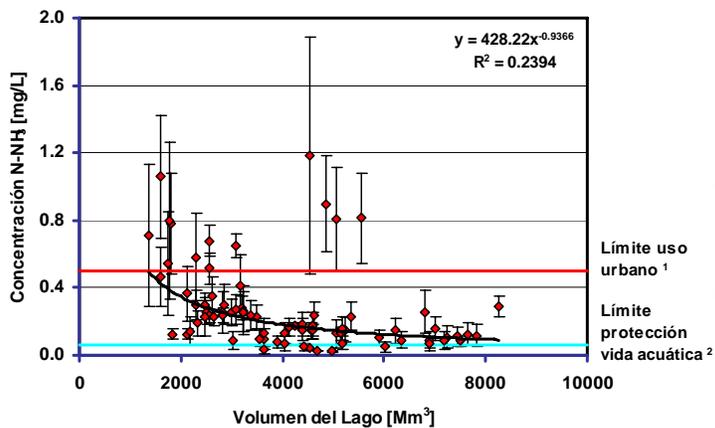
### NITRATOS



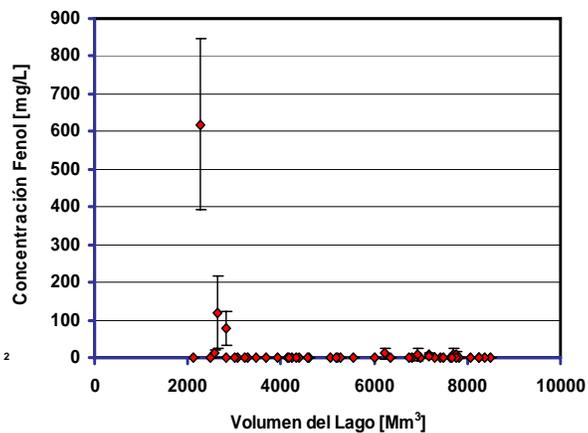
### ORTOFOSFATO



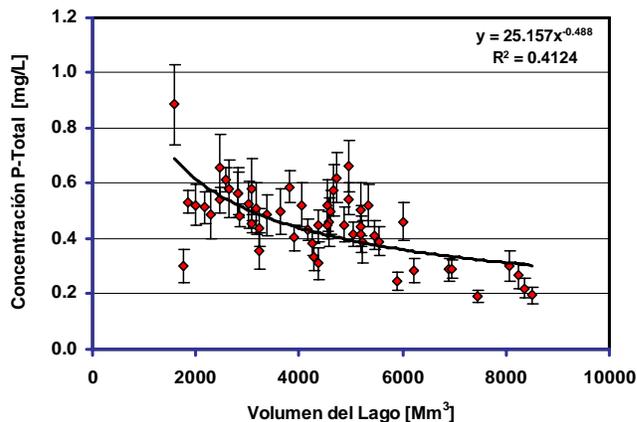
### NITRÓGENO AMONIACAL



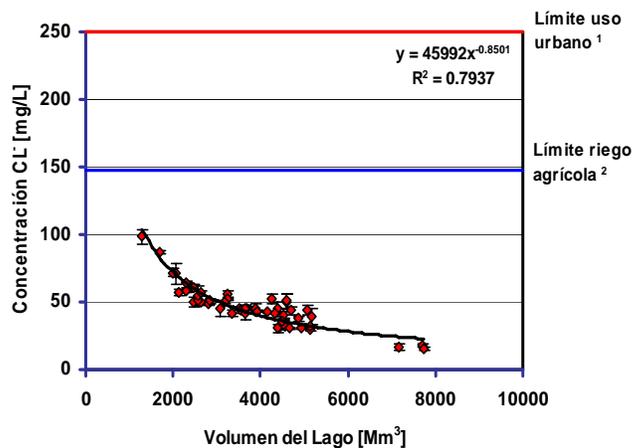
### FENOL



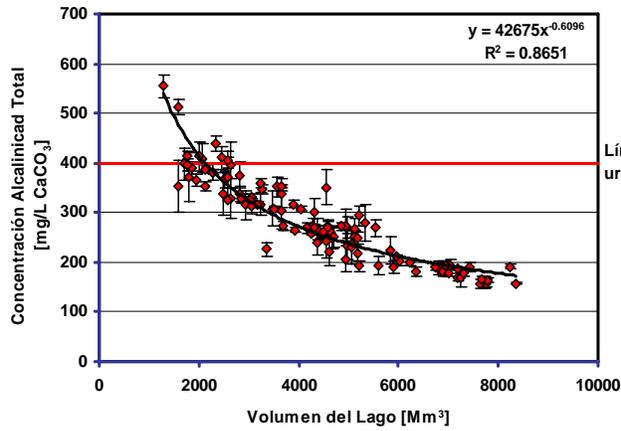
### FÓSFORO TOTAL



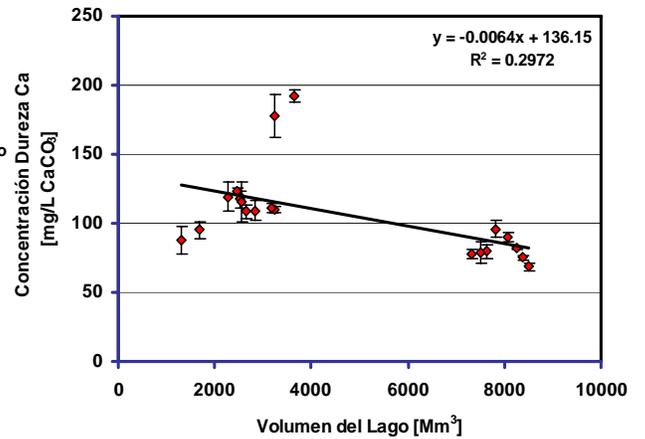
### CLORUROS



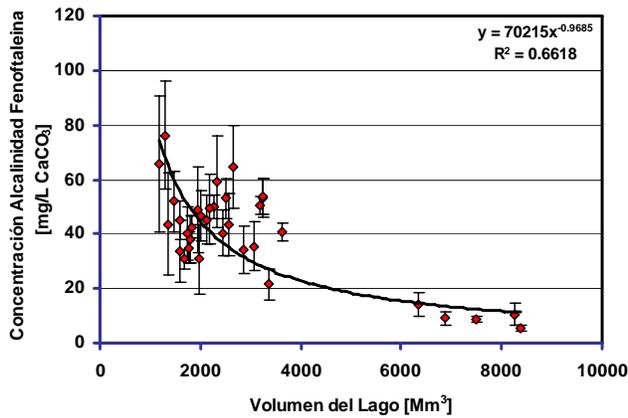
**ALCALINIDAD TOTAL**



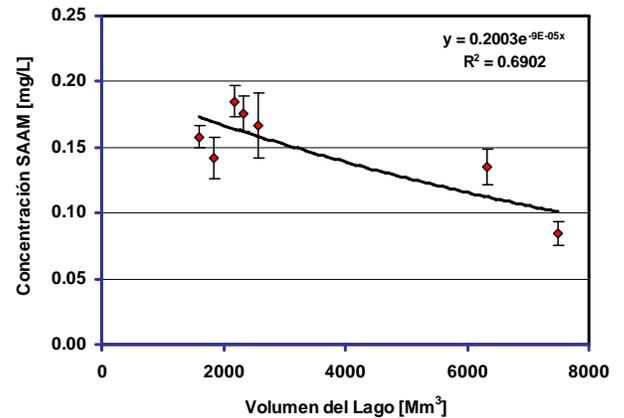
**DUREZA CALCIO**



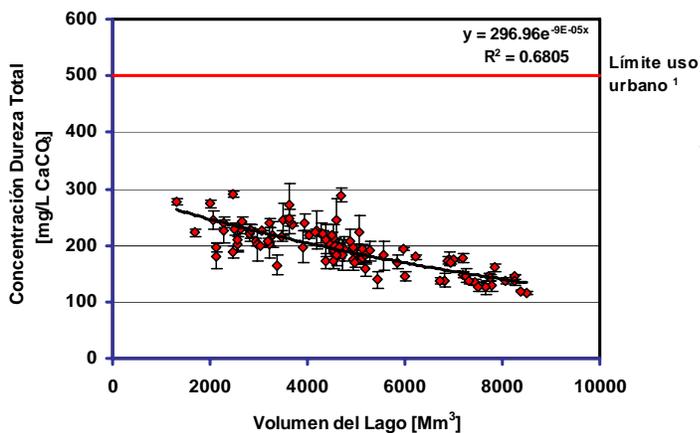
**ALCALINIDAD FENOFTALEINA**



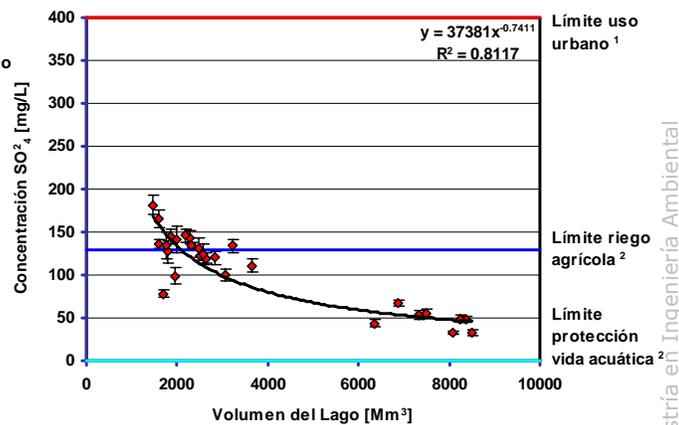
**SUSTANCIAS ACTIVAS AL AZUL DE METILENO**



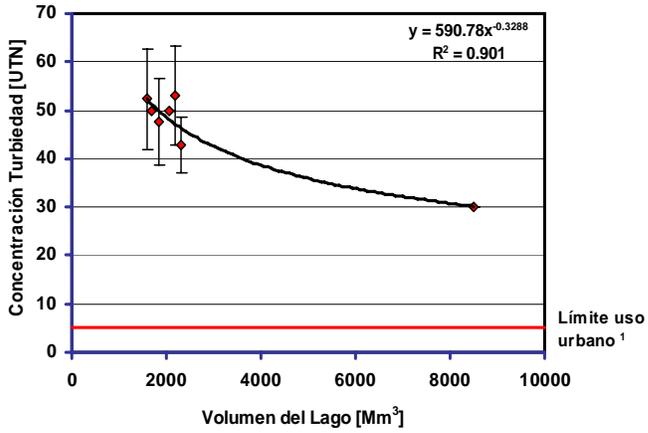
**DUREZA TOTAL**



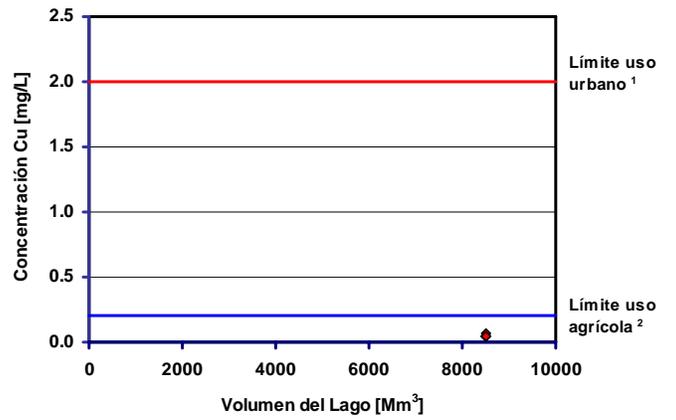
**SULFATOS**



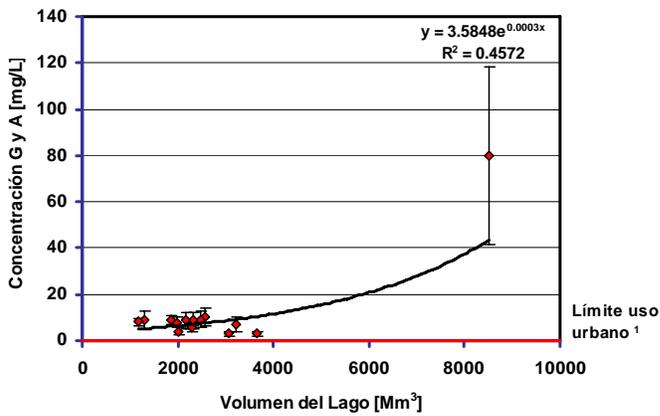
**TURBIEDAD**



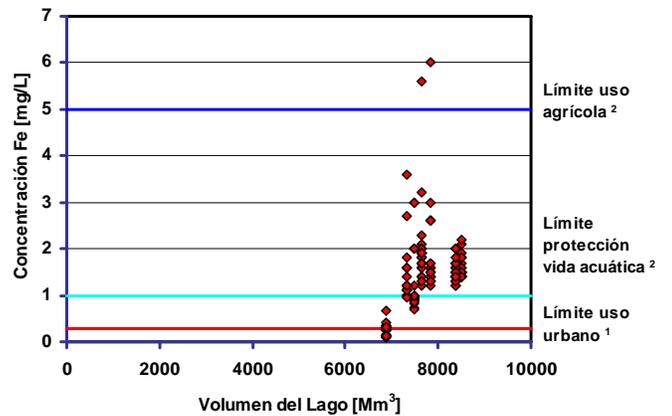
**COBRE**



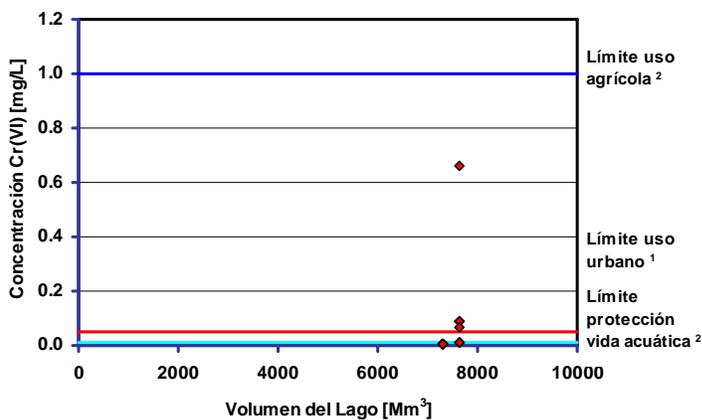
**GRASAS Y ACEITES**



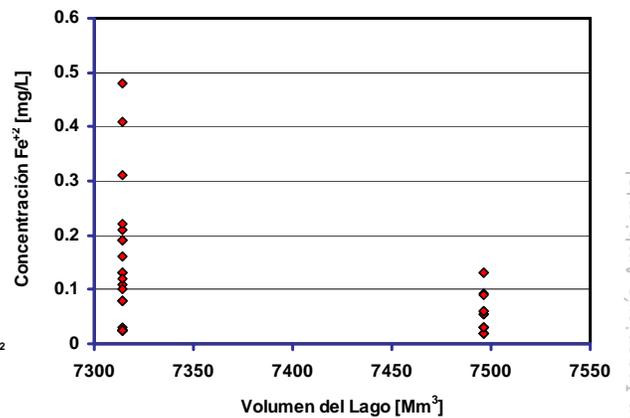
**FIERRO**



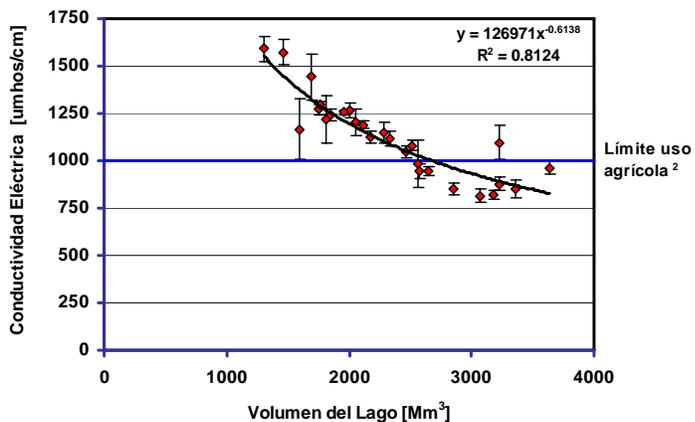
**CROMO HEXAVALENTE**



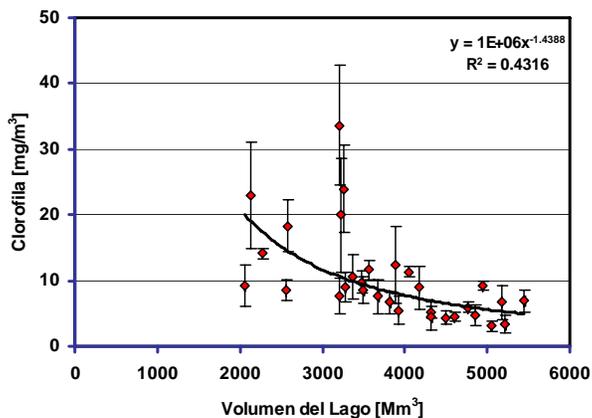
**ION FERROSO**



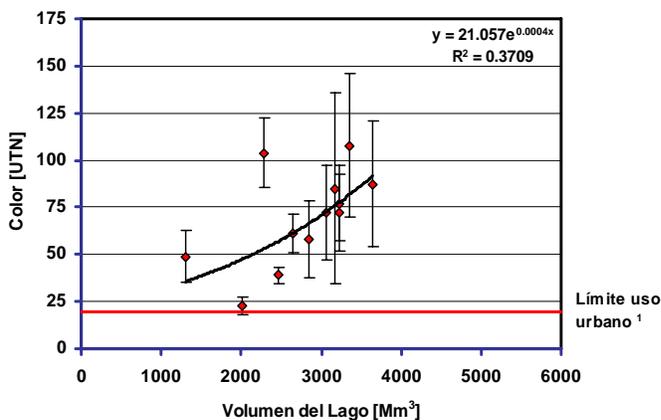
### CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA



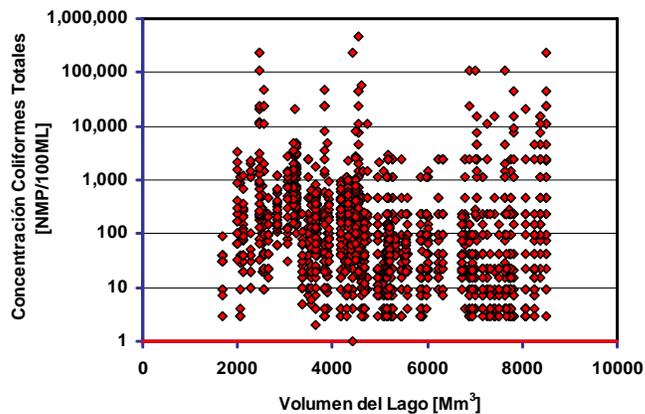
### CLOROFILA



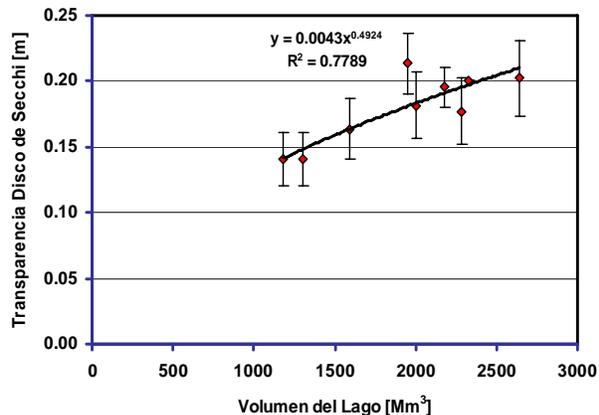
### COLOR



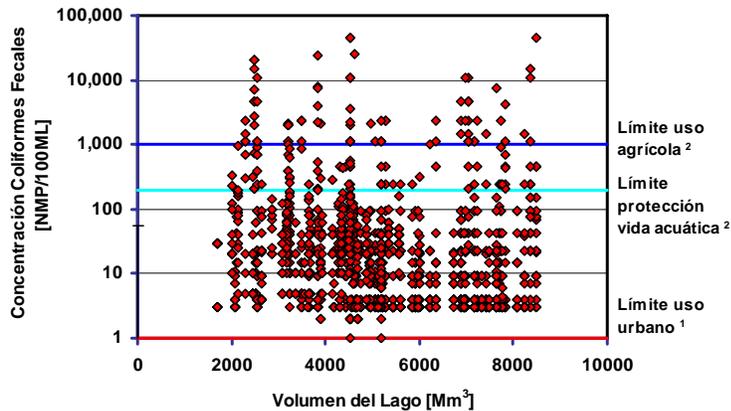
### COLIFORMES TOTALES



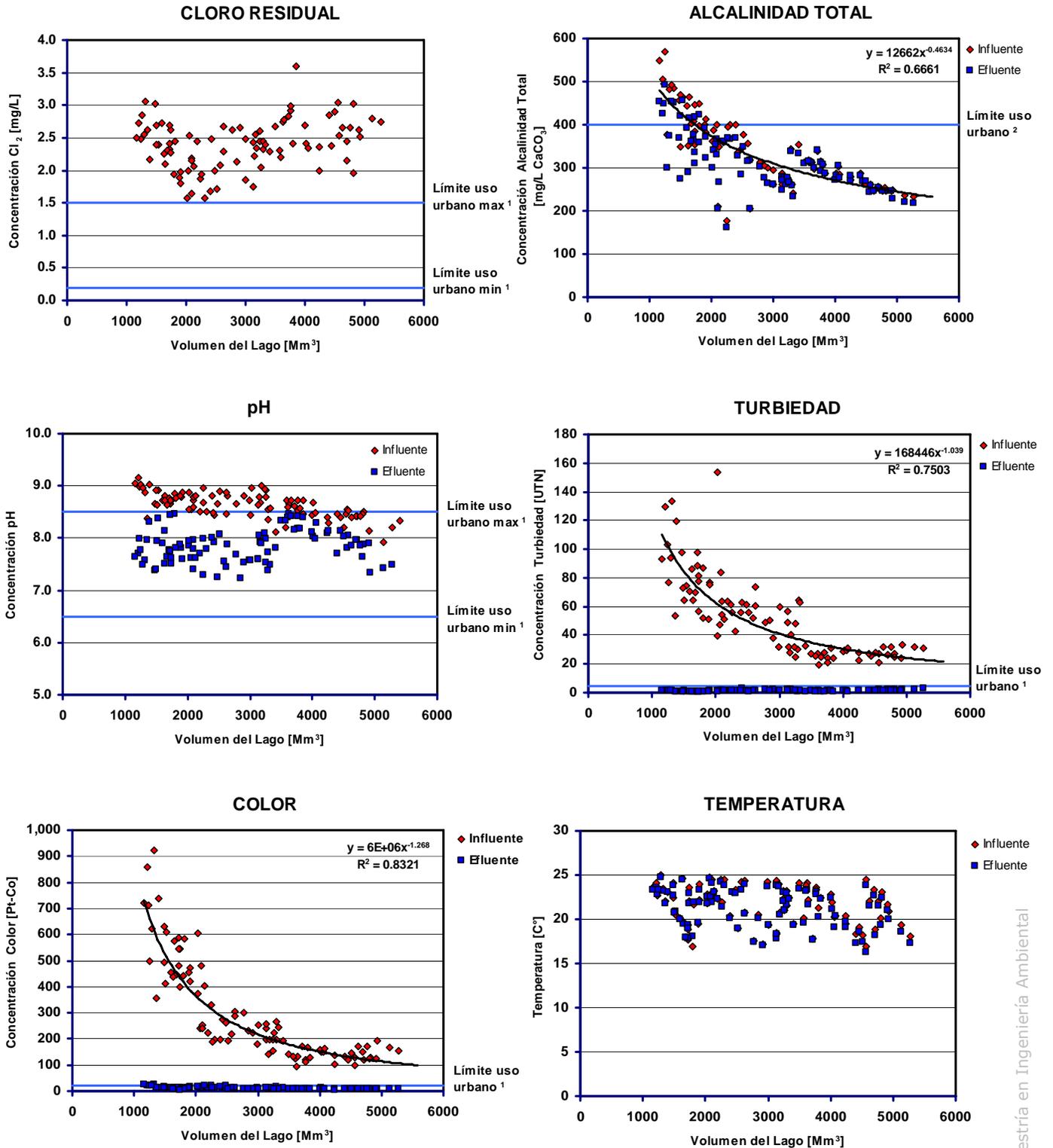
### TRANSPARENCIA DISCO DE SECCHI

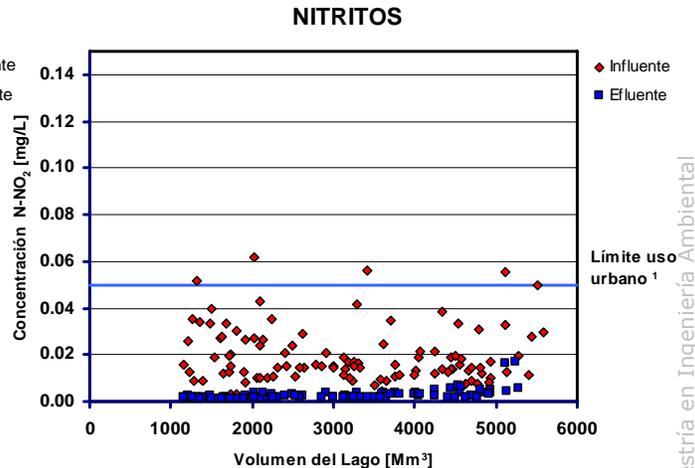
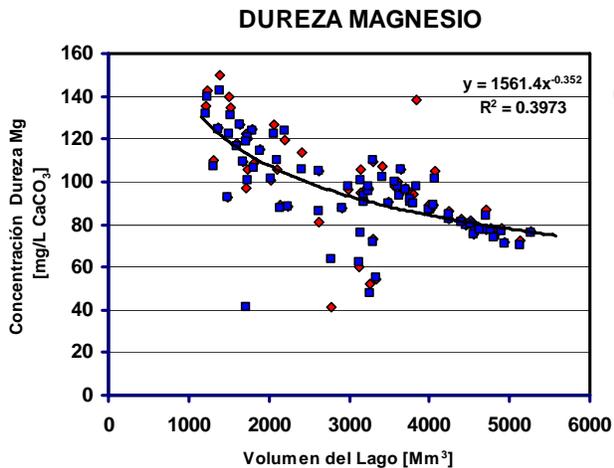
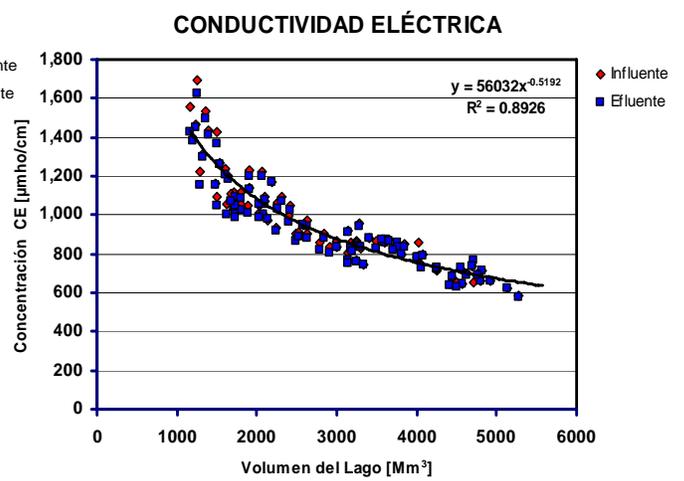
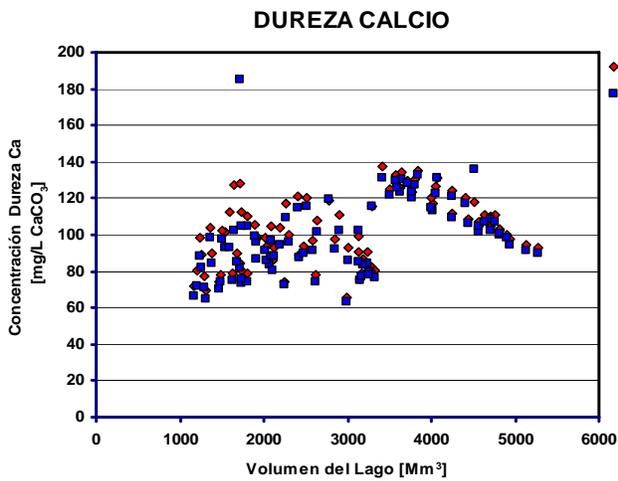
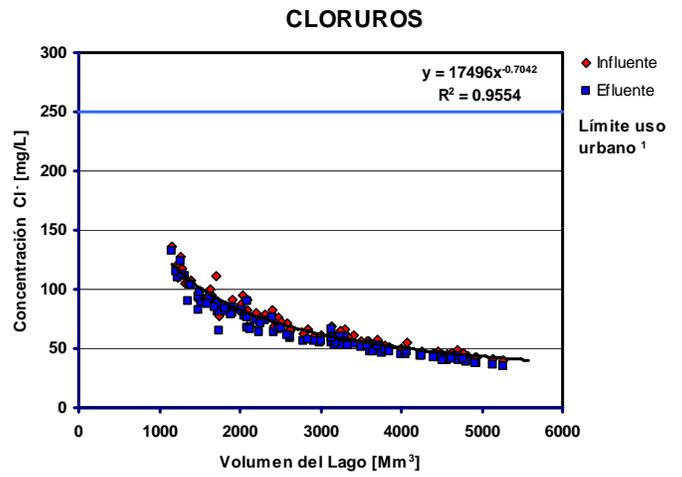
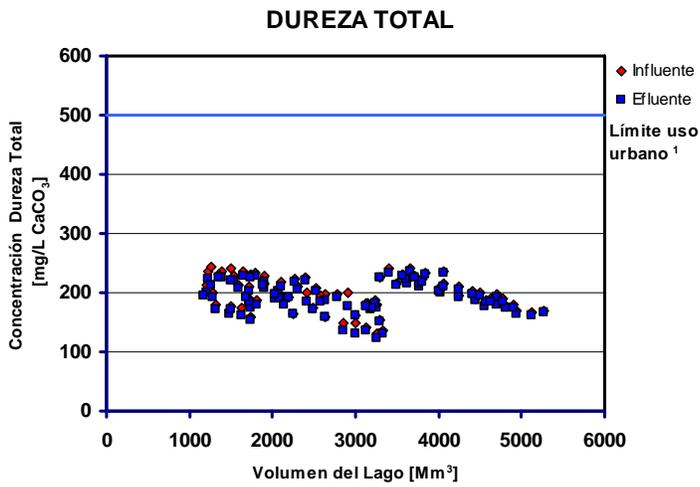


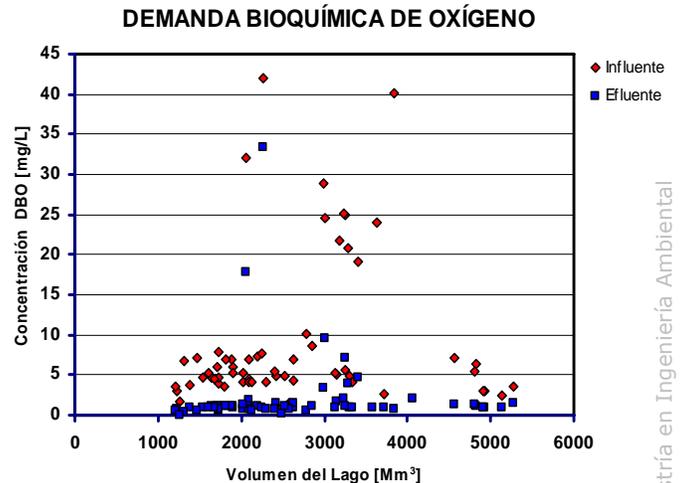
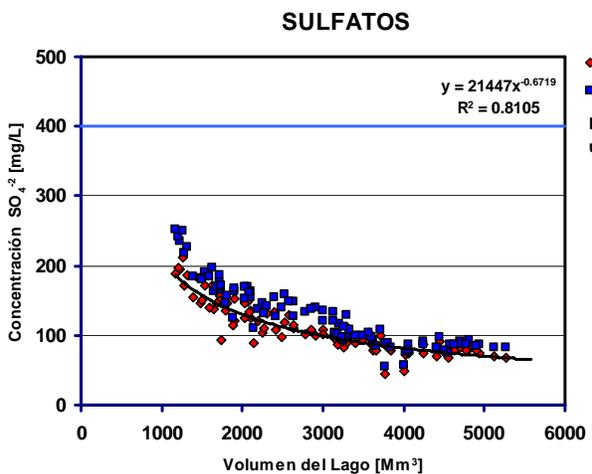
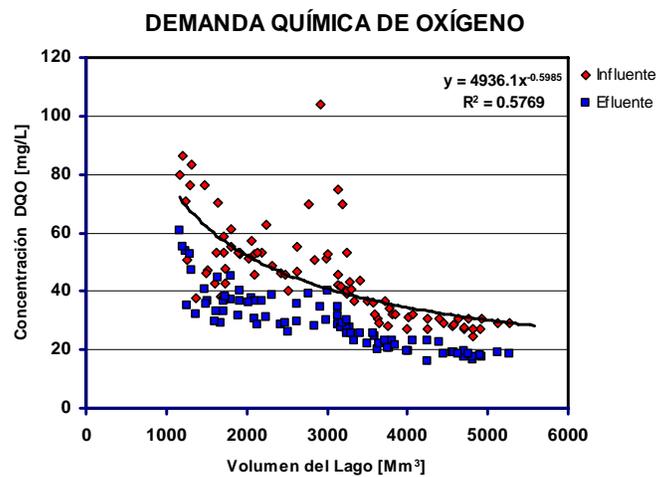
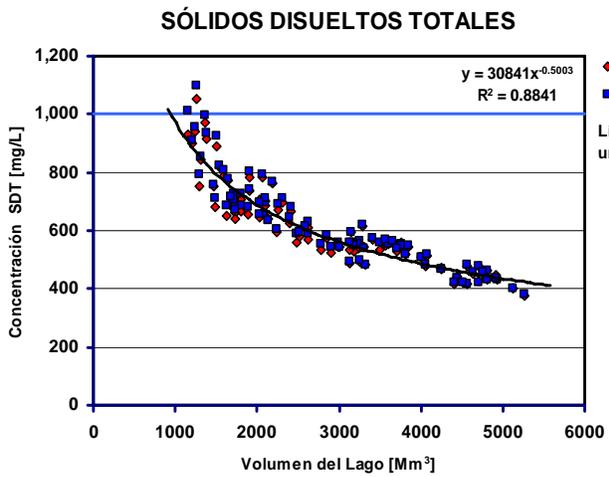
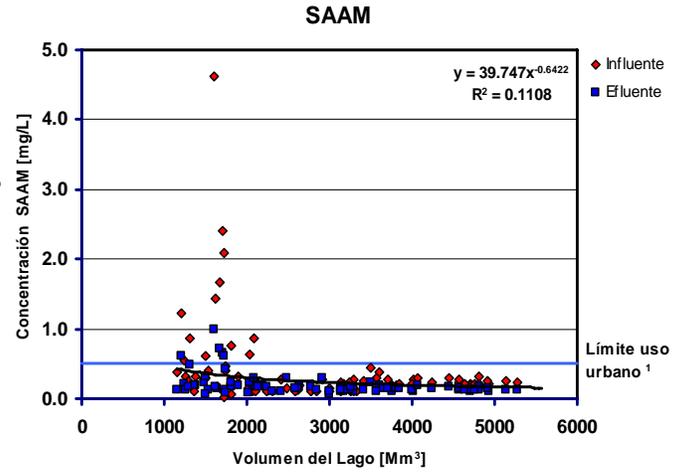
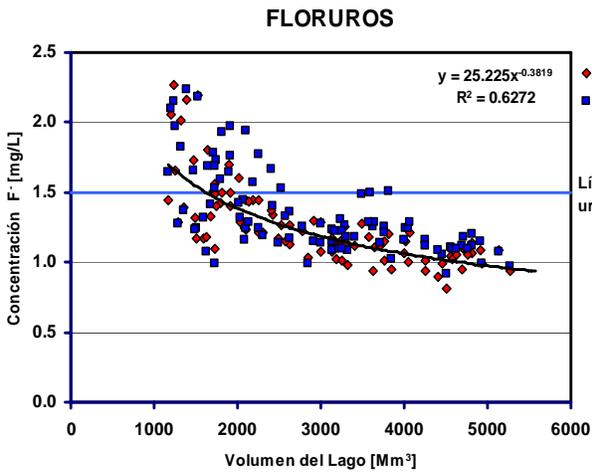
### COLIFORMES FECALES



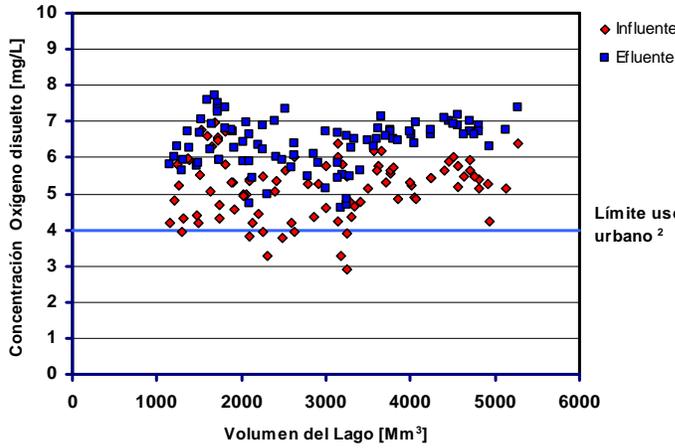
### ANEXO 3. Eficiencias de tratamiento de las plantas potabilizadoras 1 y 2 de la ciudad de Guadalajara para diferentes volúmenes del Lago de Chapala



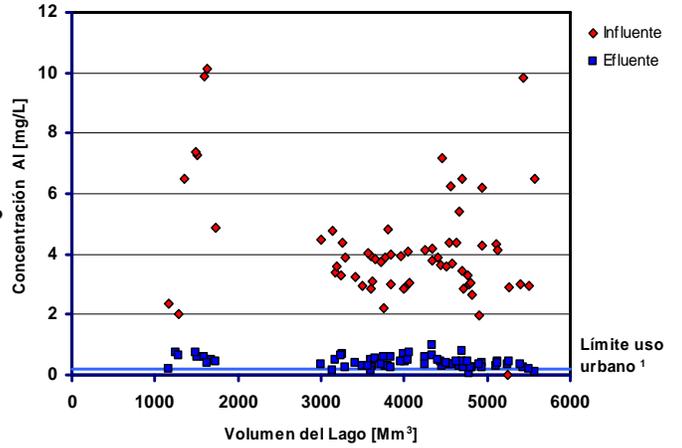




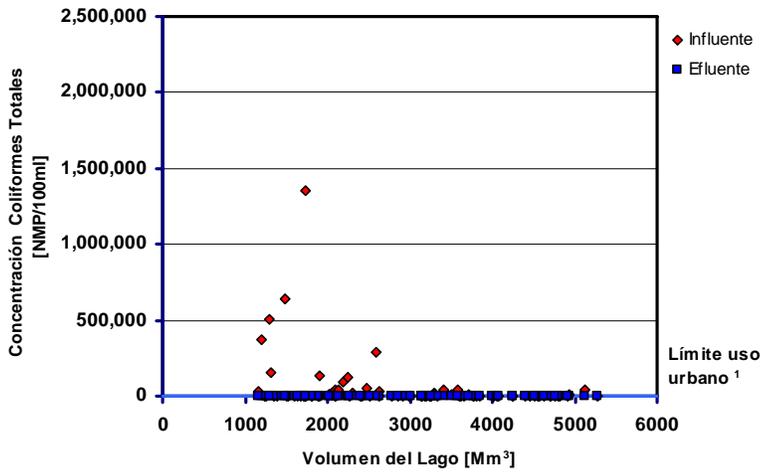
**OXÍGENO DISUELTO**



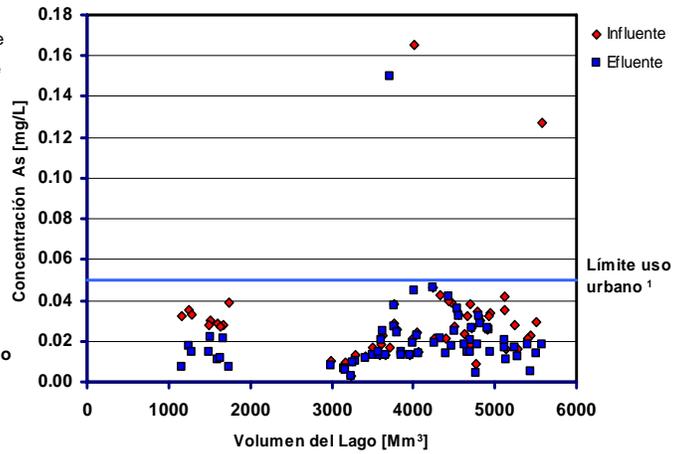
**ALUMINIO**



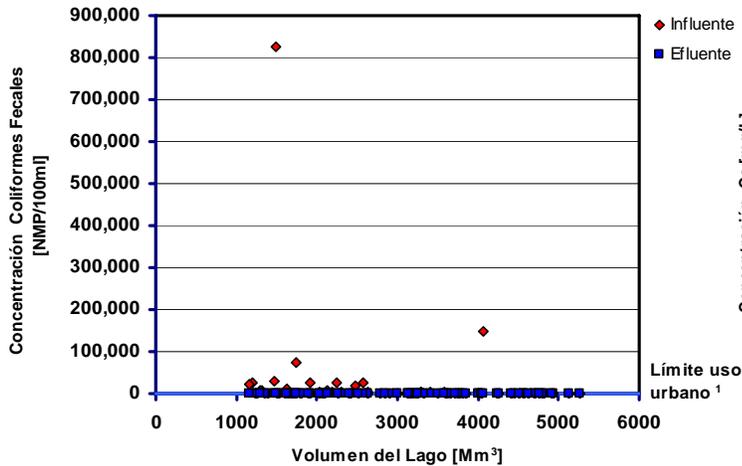
**COLIFORMES TOTALES**



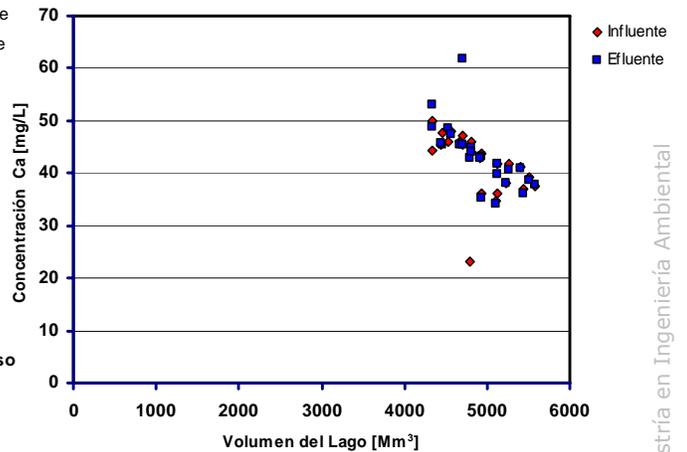
**ARSÉNICO**

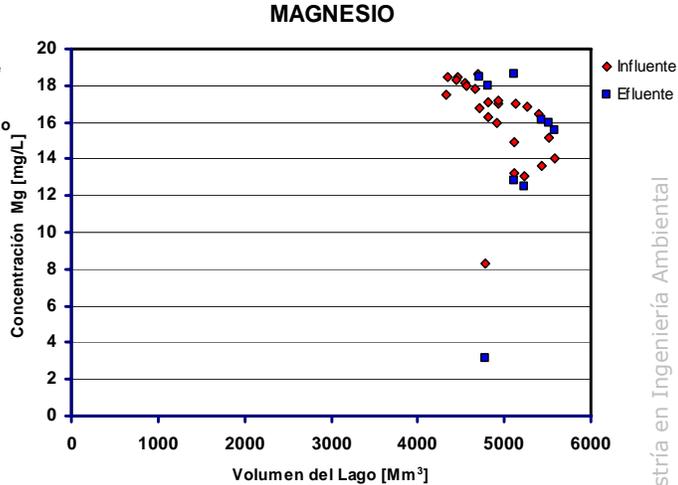
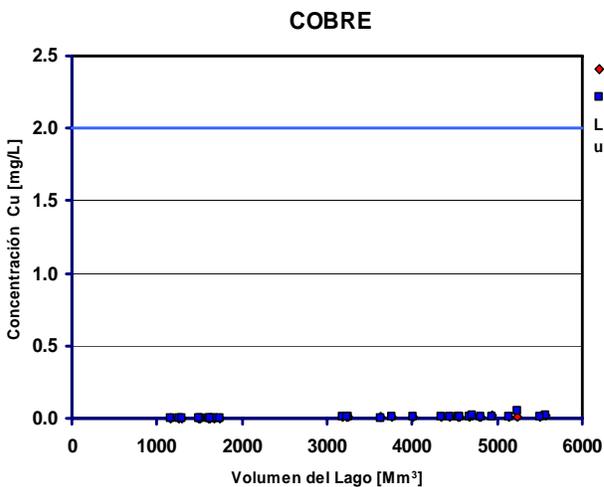
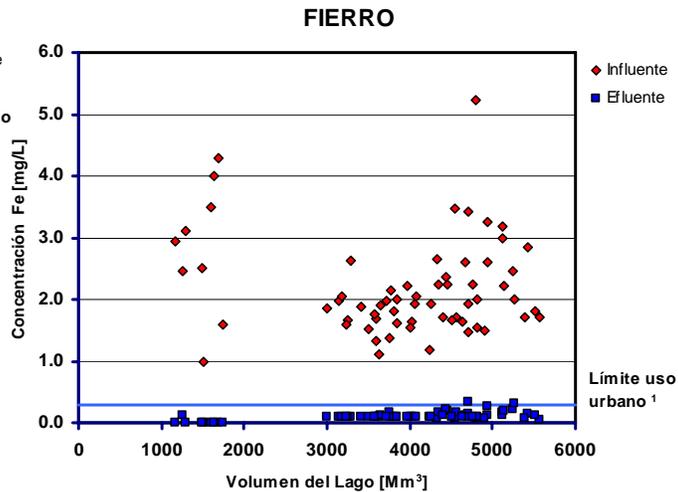
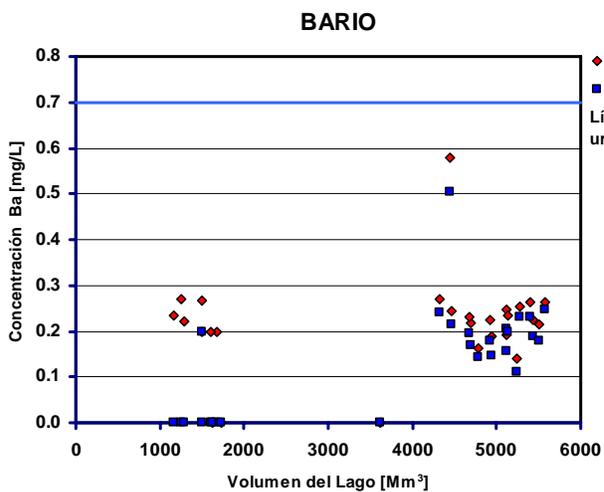
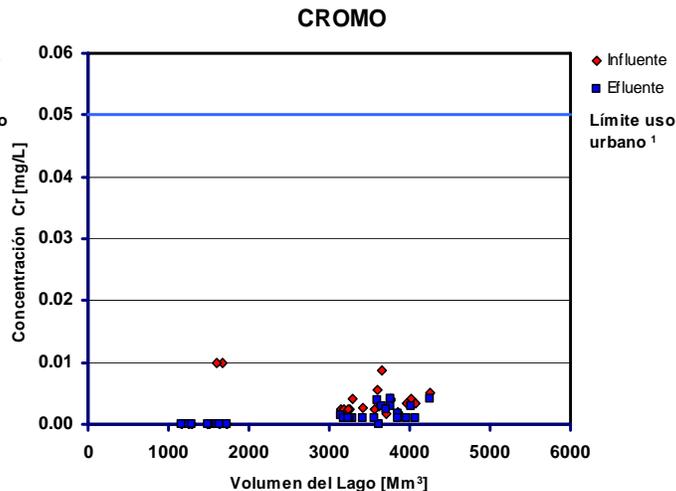
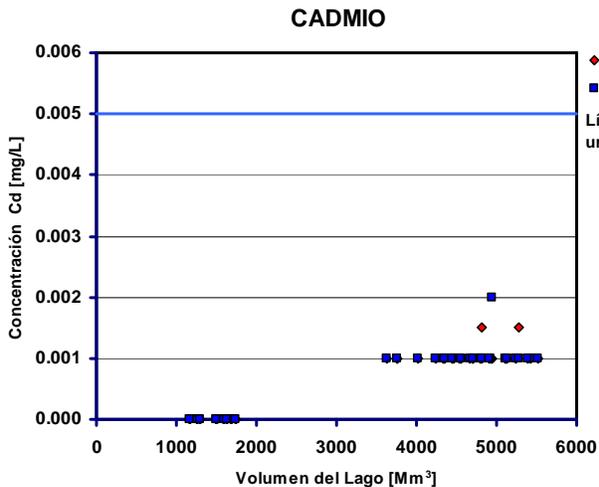


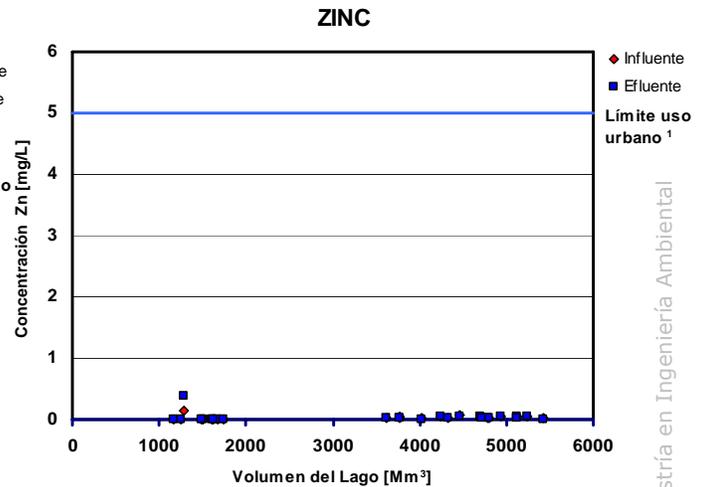
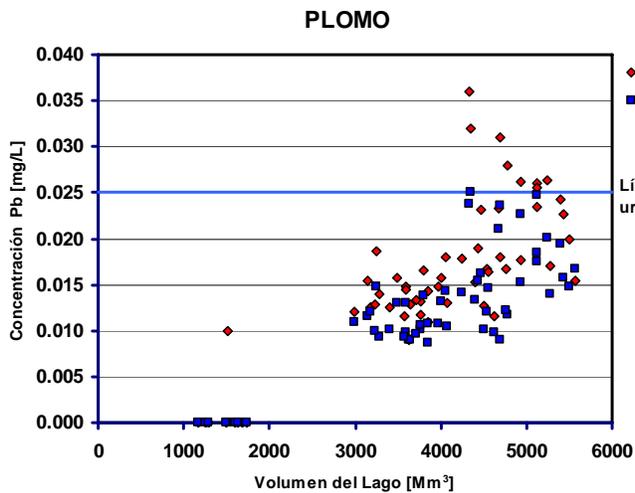
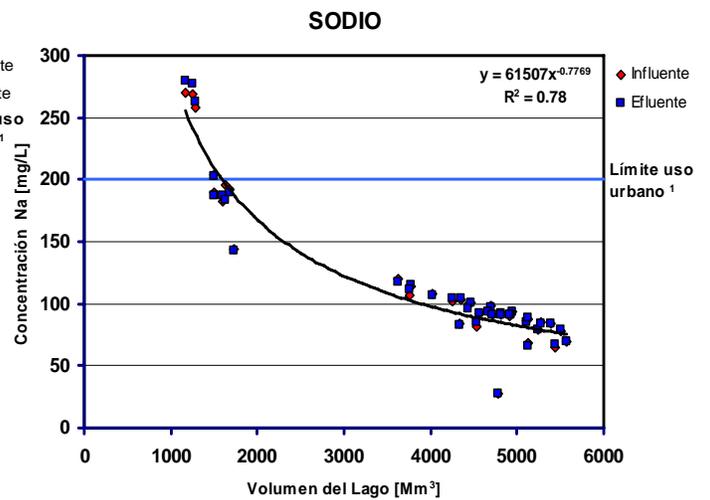
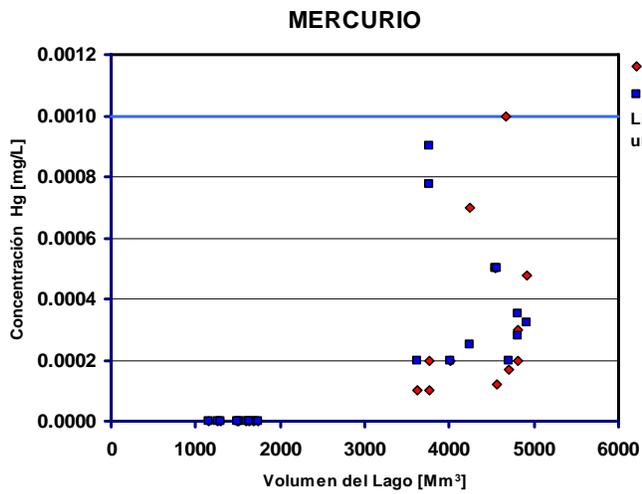
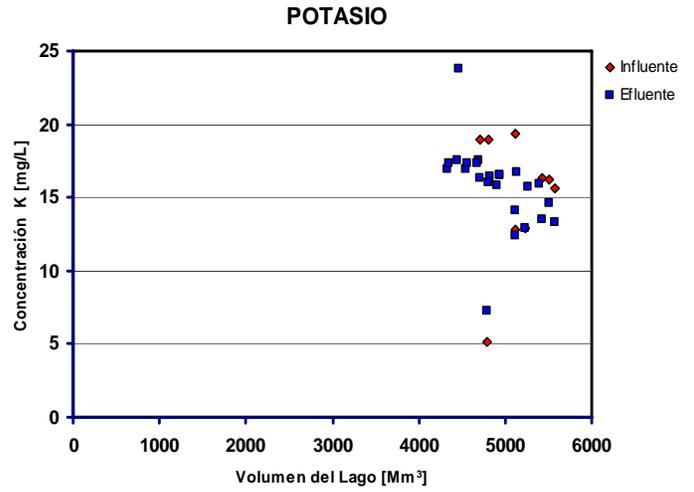
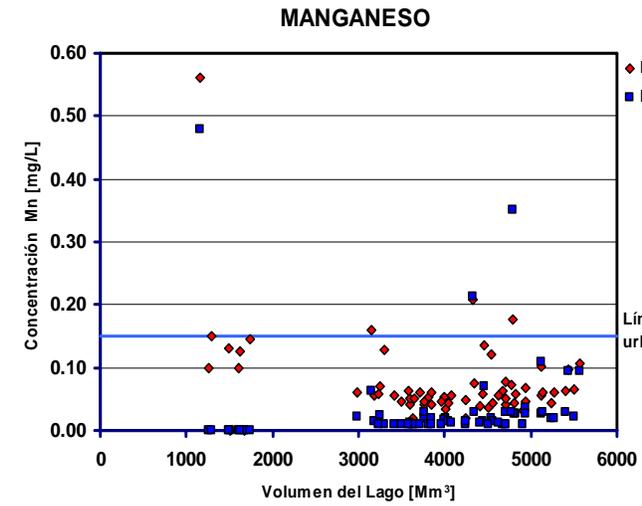
**COLIFORMES FECALES**

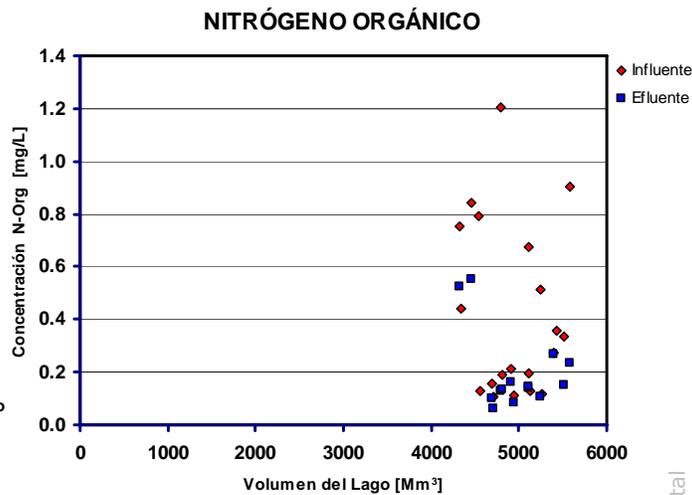
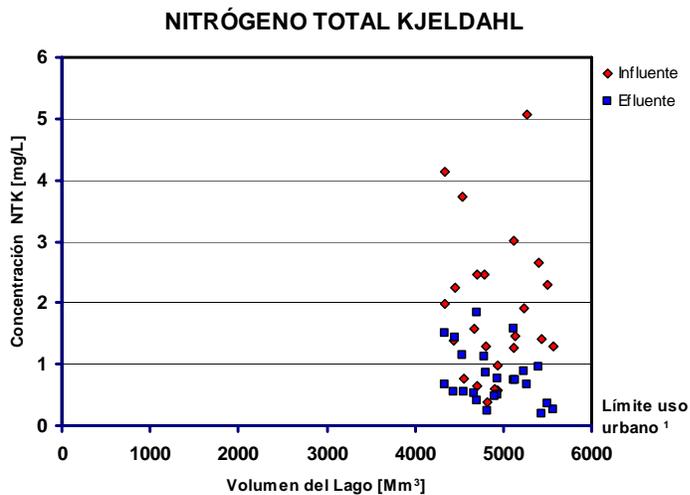
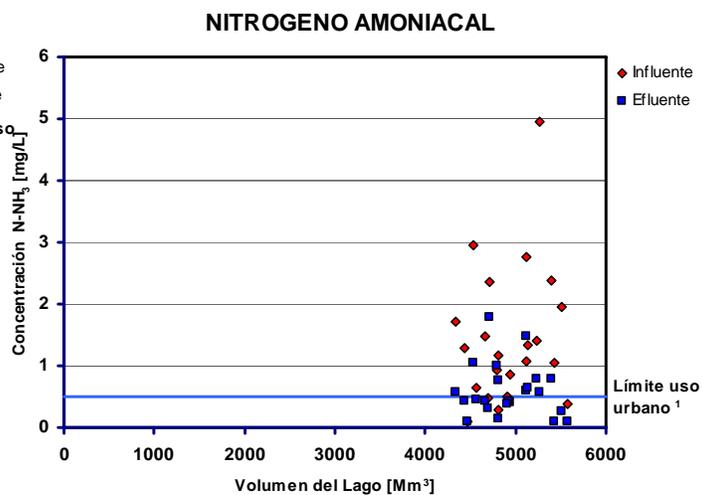
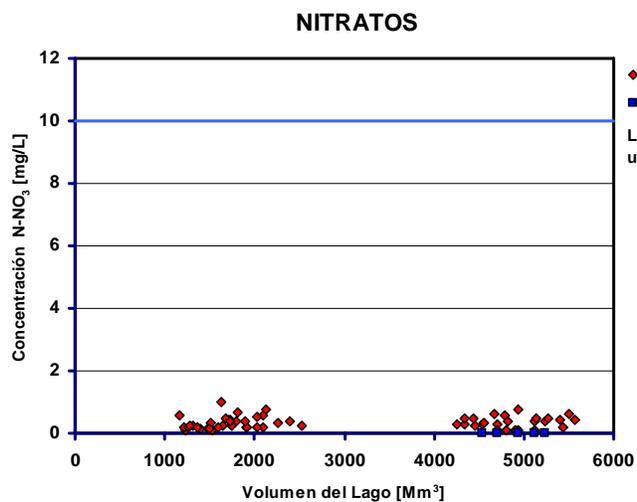


**CALCIO**

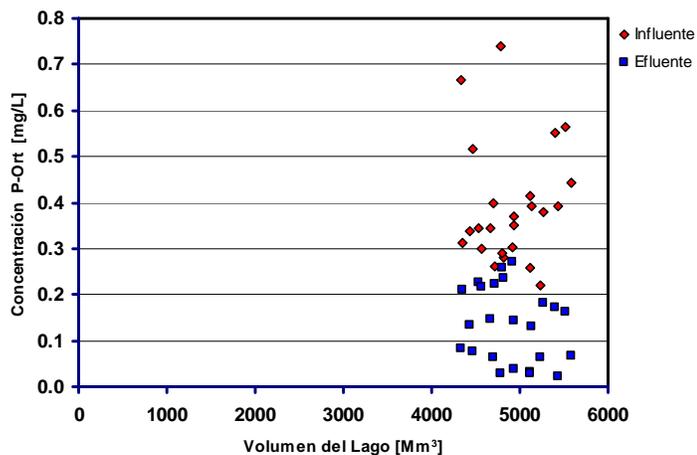




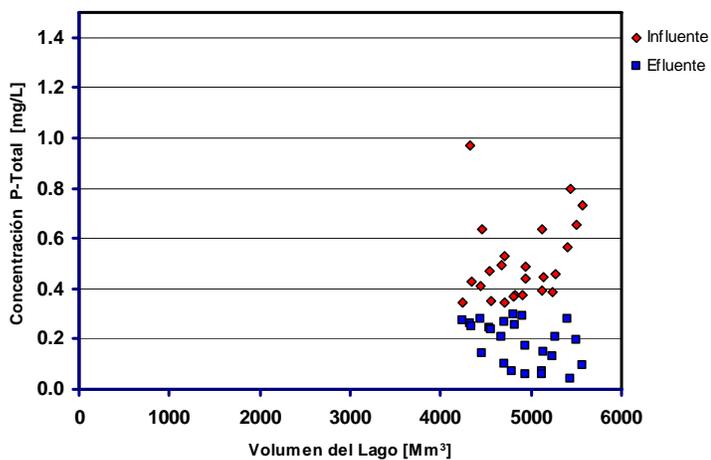




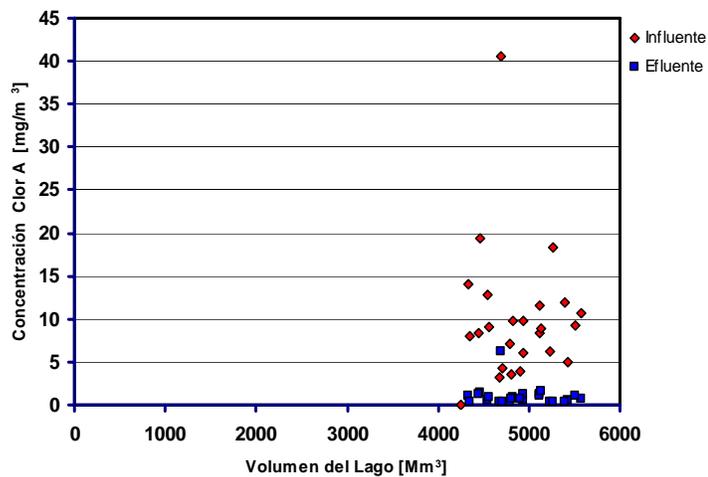
### ORTOFOSFATO



### FÓSFORO TOTAL



### CLOROFILA A



## REFERENCIAS

Arceo A. 2005. Comunicación personal. Distrito de riego 024.

Aguilar E. 2005. Comunicación personal. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

American Water Works Association (AWWA) 2002. *Calidad y tratamiento del agua. Manual de suministros de agua contaminada*. Mc Graw Hill, 5ª Edición, España, 1231 pp.

Aparicio J. 2001. *Hydrology of the Lerma – Chapala Watershed*. (en Hansen A. M. y M. van Afferden (eds) *The Lerma – Chapala Watershed, Evaluation and Management*), Kluwer Academic / Plenum Publishers. Nueva York, Sección I 3 – 30.

CNA (Comisión Nacional del Agua) 2001. Chapala: los días difíciles. *Vertientes*, vol. 7, núm. 72, pp. 20-21.

CNA (Comisión Nacional del Agua) 2001. Retos y estrategias en la Cuenca del Lerma. *Vertientes*, vol. 7, núm. 72, pp. 15-19.

de Anda - Sánchez J. y H. Shear. *Balance de Fosfatos en la cuenca del Lago de Chapala*. XI Congreso Nacional de Irrigación. Guanajuato, Gto., México, 19 -21 de Septiembre de 2001, 10 pp.

DOF (Diario Oficial de la Federación) 1989. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89*.

DOF (Diario Oficial de la Federación) 2000. *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, agua para consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*.

DOF (Diario Oficial de la Federación) 2003. *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.*

González - Lozano J. I. y A. Galindo 2003. *Estrategia para la Restauración del lago Chapala* [en línea]. Comisión de la Cuenca propia del lago de Chapala, A. C. México, 10 pp. [citado el 15 de enero del 2005]. Disponible para World Wide Web: <http://www.congresocuenecas.org.pe/pdf/>

Güitrón A. 2002. Manejo integral del agua en la cuenca Lerma – Chapala. *Tláloc*, México, pp. 19-31.

Hansen A. M. y M. van Afferden, 2001. *Summary and Conclusions* (en Hansen A. M. y M. van Afferden (eds) *The Lerma – Chapala Watershed, Evaluation and Management*), Kluwer Academic / Plenum Publishers. Nueva York, Sección V: 373 – 377.

Hidromantis, Inc., 2001. *State of the art Software for the Design and Cost Estimation for Wastewater Treatment Plants*. User's Guide, Versión 1.0: 229 pp.

IMTA, 2004. *Curso: Operaciones unitarias en plantas potabilizadoras*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 271 pp.

Lind O.T. y L. Dávalos-Lind 2001. *An Introduction to the Limnology of Lake Chapala, Jalisco, Mexico*. En: *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*. Editado por: Hansen A. M. y van Afferden M., Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp 139-149.

Leckie O. J. 2001. *Foreword*. En: *The Lerma-Chapala Watershed. Evaluation and Management*. Editado por: Hansen A. M. y van Afferden M., Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp ix.

Meftcaf y Eddy, 1996. *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. Mc Graw Hill, 3ª Edición, México, 1485 pp.

Miller R. I., J. E. Freund y R. Johnson 1990. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Prentice Hall, México, 624 pp.

Palacios, O. L., 2000. *Manual de drenaje parcelario de los distritos de riego*. Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, A5-4 pp.

Ramírez, G. A., 1988. *Criterios técnico – sanitarios para el aprovechamiento de aguas residuales en riego agrícola*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental A.C. VI Congreso Nacional Saneamiento Ambiental, Querétaro, Qro., Memorias, Tema III.

Romero R. A., 1999. *Potabilización del agua*. Editorial escuela colombiana de ingeniería. Alfaomega, 3ª Edición, México, 327 pp.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) 2003. *Lago de Chapala*. Disponible en World Wide Web: <http://portal.semarnat.gob.mx/regiones/chapala/index.shtml>

SIAPA (Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado) 1988. *Agua para la zona Metropolitana de Guadalajara 1983 – 1988*. México, 95 pp.

Valdez, Z.A., A.M. Guzmán y C.S. Peniche, 2001. *La Problemática del Lago de Chapala: Una Lectura desde la Perspectiva de las Ciencias Administrativas*. Curso: Chapala, la transición a un milenio [en línea]. Movimiento Cívico. “Todos por Chapala”, Guadalajara México, Septiembre 29 y Octubre 06, 6 pp [citado el 15 de enero del 2005]. Disponible para World Wide Web: [http://www.cuaad.udg.mx/curso\\_web/a\\_valdes.pdf](http://www.cuaad.udg.mx/curso_web/a_valdes.pdf)

Valenzuela T. J., 2004. *Exploración de posibilidades para proponer un tren de tratamiento para remoción de dureza que logre la optimización técnica y económica del proceso*. Tesis de ingeniería química con área en ingeniería de procesos. Universidad de Las Américas, Puebla, México, 106 pp.

Van Afferden, M. y A. M. Hansen, 2003. Forecast of lake volume and salt concentration in Lake Chapala, Mexico. *Aquatic Sciences*, Birkhäuser Basel, vol. 66, no. 3, pp. 257-265.

## LISTA DE FIGURAS

1.1 Vista aérea del Lago de Chapala. Imagen tomada del satélite Landsat (NASA, 2003).....	3
1.2 Comparativas fotográficas de volúmenes de agua en el lago en los años de 1976, 2002, 2003 y 2004. ....	4
1.3 Superficie del Lago de Chapala en los años 1972, 1986 y 2001.....	6
2.1 Consumidores de agua del Lago de Chapala.....	10
2.2 Localización del acueducto Chapala – Guadalajara, extracción de agua para suministro urbano.....	12
2.3 Volumen extraído para suministro urbano contra volumen del lago.....	13
2.4 Localización equipo de bombeo Abraham Guerra, extracción de agua para agricultura. ....	14
2.5 Localización módulo Ejido Modelo, extracción de agua para agricultura. ....	14
2.6 Localización módulo El Fuerte, extracción de agua para agricultura.....	15
2.7 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 024) contra volumen del lago.....	16
2.8 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 013, módulo Ejido Modelo) contra volumen del lago.....	16
2.9 Volumen extraído para agricultura (distrito de riego 013, módulo El Fuerte) contra volumen del lago.....	17
3.1 Localización de estaciones de muestreo. ....	19
3.2 Concentración – volumen para SDT utilizando toda la población de datos.....	23
3.3 Concentración – volumen para SDT utilizando todos los promedios por evento de muestreo. ....	23
3.4 Concentración – volumen para SDT utilizando valores medios con $CV < 0.15$ .....	24
3.5 Promedios de ALCALINIDAD TOTAL como función del volumen de agua en el Lago de Chapala ( $CV < 0.15$ ). ....	25
3.6 Promedios de CLORUROS como función del volumen de agua en el Lago de Chapala ( $CV < 0.15$ ). ....	25
3.7 Promedios de SULFATOS como función del volumen de agua en el Lago de Chapala ( $CV < 0.15$ ). ....	26
3.8 Promedios de DUREZA TOTAL como función del volumen de agua en el Lago de Chapala ( $CV < 0.15$ ). ....	26
4.1 Necesidades de tratamiento de agua para SDT.....	30
5.1 Diagrama de los escenarios a evaluar.....	37
5.2 Programa Capdet Works ver. 2.0 para la estimación de costos de tratamiento. ....	38
5.3 Detalle de resultados: información de diseño y costos de tratamiento para cada unidad de proceso. ....	41

5.4 Resumen de costos de tratamiento para cada unidad de proceso.....	41
5.5 Tren de tratamiento convencional, plantas potabilizadoras 1 y 2. ....	42
5.6 Comportamiento de color como función del volumen del lago. ....	43
5.7 Comportamiento de turbiedad como función del volumen del lago. ....	44
5.8 Comportamiento de SDT como función del volumen del lago. ....	44
5.9 Propuesta de tren de tratamiento, agua para suministro urbano (volumen del lago 1,000 Mm <sup>3</sup> ).....	45
5.10 Propuesta de tren de tratamiento, agua para suministro urbano (volumen del lago 2,000, 3,000 y 4,000 Mm <sup>3</sup> ).....	46
5.11 Tratamiento actual para potabilizar el agua para suministro urbano para diferentes volúmenes del lago (1,000, 2,000, 3,000 y 4,000 Mm <sup>3</sup> ).....	46
5.12 Costos de potabilización anual y por m <sup>3</sup> de agua con tratamiento actual para suministro urbano como función del volumen del lago. ....	47
5.13 Costo anual con tratamiento actual real y calculado como función del volumen del lago. ...	49
5.14 Costo unitario de tratamiento actual real y calculado como función del volumen del lago. ....	50
5.15 Tratamiento convencional + intercambio iónico + tratamiento de lodos para suministro urbano (volumen del lago 1,000 Mm <sup>3</sup> ).....	51
5.16 Tratamiento convencional + tratamiento de lodos para suministro urbano (2,000, 3,000 y 4,000 Mm <sup>3</sup> ).....	51
5.17 Costos de potabilización anual y por m <sup>3</sup> de agua con intercambio iónico y tratamiento de lodos para suministro urbano como función del volumen del lago. ....	52
5.18 Propuesta de tren de tratamiento agua para uso agrícola (volumen del lago 2,000, 3,000 y 4,000 Mm <sup>3</sup> ).....	53
5.19 Tratamiento de agua para uso agrícola para diferentes volúmenes del lago. ....	54
5.20 Costos de tratamiento anual y por m <sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo La Palma como función del volumen del lago.....	55
5.21 Costos de tratamiento anual y por m <sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo El Fuerte como función del volumen del lago.....	56
5.22 Costos de tratamiento anual y por m <sup>3</sup> de agua para uso agrícola Módulo Ejido Modelo como función del volumen del lago.....	56

## LISTA DE TABLAS

1.1 Principales características hidrológicas del Lago de Chapala (CNA-IMTA, 2000 y Aguilar, 2005).....	4
2.1 Volúmenes extraídos del lago para Guadalajara.....	12
2.2 Volúmenes extraídos del lago para riego agrícola.....	15
2.3 Información proporcionada por los distritos de riego.....	18
3.1 Parámetros de calidad del agua del Lago de Chapala de abril 1974 a diciembre 2001 y resultados del filtrado estadístico.....	21
3.2 Análisis de los datos de calidad del agua, para la construcción de la gráfica volumen – concentración.....	22
3.3 Análisis estadístico de datos de monitoreo de calidad del agua en el Lago de Chapala .....	27
4.1 Volúmenes mínimos del lago para garantizar la calidad del agua para diferentes usos.....	31
4.2 Parámetros que rebasan los límites para suministro urbano a diferentes volúmenes del lago. ....	32
4.3 Parámetros que rebasan los límites para riego agrícola a diferentes volúmenes del lago.....	33
4.4 Gastos de agua a tratamiento para uso agrícola.....	34
5.1 Operaciones unitarias utilizadas en la potabilización del agua.....	36
5.2 Parámetros de calidad del agua requeridos por el programa.....	39
5.3 Precios unitarios requeridos por el programa Capdet Works.....	40
5.4 Costos de potabilización del agua con tratamiento actual, evaluados en Capdet Works.....	47
5.5 Costos de tratamiento anual de las plantas potabilizadoras 1 y 2 SIAPA 2005.....	48
5.6 Costos de potabilización del agua con tratamiento actual, sin costos de obra civil y materiales evaluados en Capdet Works.....	49
5.7 Costo anual de tratamiento actual: calculado y real.....	49
5.8 Costo unitario de tratamiento actual: calculado vs real.....	50
5.9 Costos de potabilización del agua con tratamiento convencional actual con y sin intercambio iónico y adicionando tratamiento de lodos, evaluados en Capdet Works.....	52
5.10 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo La Palma, evaluados con Capdet Works.....	54
5.11 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo El Fuerte, evaluados con Capdet Works.....	54
5.12 Costos de tratamiento del agua uso agrícola Módulo Modelo, evaluados con Capdet Works.....	54

## NOMENCLATURA

\$	Pesos mexicanos
°C	Grados centígrados
Al	Aluminio
As	Arsénico
B	Boro
Ba	Bario
C	Carbono
Ca	Calcio
Cd	Cadmio
CE	Conductividad eléctrica
CEAS	Comisión Estatal de Agua y Saneamiento
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Cl	Cloro
Cl <sup>-</sup>	Cloruros
cm	Centímetros
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción
CNA	Comisión Nacional del Agua
CO <sup>-2</sup> <sub>3</sub>	Carbonato
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Cr	Cromo
Cr(VI)	Cromo hexavalente
Cu	Cobre
CV	Coeficiente de variación
DBO <sub>5</sub>	Demanda química de oxígeno a cinco días
DQO	Demanda bioquímica de oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
F <sup>-</sup>	Fluoruro
Fe	Fierro
Fe <sup>+2</sup>	Ión Ferroso
G y A	Grasas y aceites
h	Hora
H <sub>2</sub> S	Ácido sulfhídrico
ha	Hectárea
HCO <sub>3</sub>	Bicarbonato
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
K	Potasio
km	Kilómetros
km <sup>2</sup>	Kilómetros cuadrados
L	Litros
lps	Litros por segundo
m	Metros
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Mant	Mantenimiento
$\bar{x}$	Media
mg	Miligramos

ml	Mililitros
mm	Milímetros
Mm <sup>3</sup>	Millones de metros cúbicos
Mn	Manganeso
N	Nitrógeno
Na	Sodio
N-NH <sub>3</sub>	Nitrógeno amoniacal
N-NO <sub>2</sub>	Nitritos
N-NO <sub>3</sub>	Nitratos
N-Org	Nitrógeno orgánico
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
O	Oxígeno
OD	Oxígeno disuelto
pH	Potencial de hidrógeno
Pb	Plomo
P-Ort	Ortofosfato
Pt-Co	Escala de color platino – cobalto
P-Tot	Fósforo total
Q	Gasto
S	Azufre
s	Desviación estándar
s	Segundos
SAAM	Substancias activas al azul de metileno
SDF	Sólidos disueltos fijos
SDT	Sólidos disueltos totales
SDV	Sólidos disueltos volátiles
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAPA	Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Sulfatos
SSF	Sólidos suspendidos fijos
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
STF	Sólidos totales fijos
STV	Sólidos totales volátiles
t	Tonelada
UTN	Unidades de turbiedad nefelométricas
Zn	Zinc