

**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Química**  
**Maestría en Ciencias Ambientales**

**Evaluación de la contaminación de la presa La Purísima  
mediante el análisis de metales, hidrocarburos y plaguicidas  
en muestras de agua, sedimento y a través del uso de  
biomarcadores en peces**

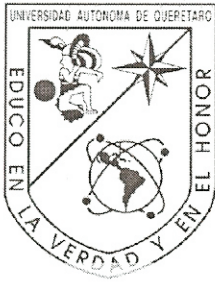
**Tesis**

**Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:  
Maestro en Ciencias Ambientales**

**Presenta**  
**Griselda Rivera Sánchez**

**Dirigido por**  
**Dra. Norma Gabriela Rojas Avelizapa**

**Santiago de Querétaro, Junio 2011**



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Química  
Maestría en Ciencias Ambientales

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LA PRESA LA PURÍSIMA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE METALES, HIDROCARBUROS Y PLAGUICIDAS EN MUESTRAS DE AGUA, SEDIMENTO Y A TRAVÉS DEL USO DE BIOMARCADORES EN PECES

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias Ambientales

**Presenta:**

I.A. Griselda Rivera Sánchez

**Dirigido por:**

Dra. Norma Gabriela Rojas Avelizapa

**SINODALES:**

Dra. Norma Gabriela Rojas Avelizapa  
Presidente

Firma

Dr. Miguel Ángel Rea López  
Secretario

Firma

Dr. Guillermo Cabrera López  
Vocal

  
Firma

Dr. Wilverth Rodulfo Villatoro Monzón  
Suplente

  
Firma

M. en C. Miguel Ángel Rico Rodríguez  
Suplente

  
Firma

Q.B. Magali Elizabeth Aguilar Ortiz  
Director de la Facultad de Química

  
Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario,  
Querétaro, Qro.  
Junio de 2011  
México



## RESUMEN

El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar y caracterizar la contaminación en la presa La Purísima. El estudio de caracterización consistió en el análisis de hidrocarburos fracción media, hidrocarburos poliaromáticos, plaguicidas organoclorados, metales y parámetros físicos y químicos en muestras de agua y sedimento de la presa. Como parte de la evaluación de la calidad del agua de la presa y su efecto en peces, se identificaron los peces presentes en la misma, se estimó un índice de calidad del agua y se analizaron dos biomarcadores (lipoperoxidación y acetilcolinesterasa) en tejidos de los peces (*G. atripinnis*). Adicionalmente, para conocer la concentración de contaminantes en pescados destinados al consumo humano, se analizaron metales en diferentes tejidos de tilapias. Los resultados de este estudio reflejan la presencia de hidrocarburos fracción media en un solo punto en los sedimentos (999 mg/kg). Así mismo, no fueron encontrados hidrocarburos poliaromáticos ni plaguicidas organoclorados en el agua y sedimento de la presa. Se encontraron los siguientes parámetros fuera de la normatividad mexicana en algunos puntos de muestreo: pH, fósforo soluble, coliformes fecales y sustancias activas al azul de metileno. También se encontraron concentraciones mayores a la normatividad mexicana de mercurio y selenio en el agua (5.0 µg/L y 10.6 µg/L respectivamente) y mercurio y vanadio en el sedimento (58.8 mg/kg y 182.1 mg/kg). Los peces identificados en la presa fueron *Oreochromis sp.* (tilapias), *Chirostoma sp.* (charales), *Xenotoca variata* y *Goodea atripinnis*, siendo *X. variata* y *G. atripinnis* de gran importancia debido a que son endémicos de México. En la evaluación de biomarcadores en tejidos de los peces no se encontraron diferencias significativas entre el agua del control y el agua de la presa sin embargo, los valores de lipoperoxidación en *G. atripinnis* superan los valores encontrados en otros estudios para esta misma especie. El índice de calidad de agua sugiere que la calidad de la misma se encuentra en un intervalo aceptable. Por otra parte, y a excepción de la plata, todos los metales analizados en el músculo de tilapias fueron detectados, hallando concentraciones de plomo que rebasan los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana para pescado fresco-refrigerado.

(Palabras clave: agua, sedimentos, metales, lipoperoxidación, acetilcolinesterasa)

## ABSTRACT

The aim of the present research was to study and characterize the pollution in La Purísima dam. The characterization consisted in the analysis of diesel hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, organochlorine pesticides, metals, physical and chemical parameters in both water and sediment samples from La Purisima dam. As part of the research for evaluating the water quality and its effects on fish, those species were identified, the water quality index was also estimated and two biomarkers (lipid peroxidation and acetylcholinesterase) in fish tissues (*G. atripinnis*) were analyzed. Additionally, in order to know the pollutant concentration in fish for human consumption, the metals concentrations in tilapia tissues were analyzed. The results obtained showed the presence of media fraction diesel hydrocarbons at a single point in the sediments, however the concentration was low (999 mg/kg). Likewise, neither polyaromatic hydrocarbons nor organochlorine pesticides were found in water and sediment. During water characterization, the following water parameters were found outside permissible levels of Mexican regulations in some sampling points: pH, soluble phosphorus, fecal coliforms and methylene blue active substances (MBAS). Concentrations observed of mercury and selenium in water (5.0 µg/L and 10.6 µg/L respectively) and mercury and vanadium in sediment (58.8 mg/kg y 182.1 mg/kg) were higher than those maximum permissible limits of Mexican regulations. Identified fish in dam were *Oreochromis sp.* (tilapias), *Chirostoma sp.* (charales), *Xenotoca variata* and *Goodea. Atripinnis. X. variata* and *G. atripinnis*, which are very important since they are endemic species in Mexico. Biomarkers evaluation in fish tissues demonstrated that no significant differences were found between the control water and dam water; however, lipid peroxidation values in *G. atripinnis* exceed the values found in others studies for the same species. Water quality index in this reservoir suggests that its quality is within an acceptable range. Moreover, and except for silver, all analyzed metals in tilapia muscles were found, and lead concentrations exceeded the permissible limits of Mexican regulations for fresh-chilled fish.

(Key Words: water, sediments, metals, lipid-peroxidation, acetylcholinesterase)

## DEDICATORIA

*A mis padres y hermanos...*

*A Ofe y a Celia....*

## AGRADECIMIENTOS

*Al proyecto FOMIX-GTO-2006-C01-27738 titulado “Caracterización de la contaminación de la Presa La Purísima con fines de remediación” mediante el cual fue posible la realización de esta tesis.*

*A la Dra. Norma Gabriela Rojas Avelizapa por su dirección y apoyo en la realización de este trabajo y al Dr. Miguel Ángel Rea López, Dr. Guillermo Cabrera López, Dr. Wilverth Rodulfo Villatoro Monzón y al M. en C. Miguel Ángel Rico Rodríguez por sus valiosas aportaciones.*

*Al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada CICATA-IPN Querétaro por permitirme la realización de la tesis en sus instalaciones.*

*A la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas – ENCB (Lab. de Ictiología y Limnología) por el apoyo en sus instalaciones, equipo y asesoría para el desarrollo de la etapa de evaluación de biomarcadores, especialmente a la Dra. Eugenia López López, Dr. Jacinto Elías Sedeño Díaz y M. en C. Ricardo Tejeda Vera.*

*Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica- IPICYT (Lab. de Ing. Ambiental) por el apoyo en sus instalaciones, equipo y asesoría para el desarrollo de los análisis de carbono total, bromuros, cloruros y sulfatos, especialmente a la Dra. María de Lourdes Berenice Celis García y Dr. Elías Razo Flores.*

*Al Centro de Geociencias (Laboratorio de Geoquímica Ambiental) – UNAM-Juriquilla por el apoyo para la realización de los análisis de metales en agua y sedimentos, especialmente a la M. en C. Ofelia Pérez Arvizu.*

*A los Laboratorios ABC por el apoyo para la realización de los análisis de compuestos orgánicos en agua y sedimentos.*

*A la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas – ENCB y a VARIAN por el apoyo en las mediciones de metales en peces.*

*A Lety, Carmelita y Laura por su apoyo en los trámites administrativo en la UAQ.*

*A los compañeros y amigos de la maestría, especialmente a Sagrario, Rocío, Darío y Pepe.*

*A los amigos de CICATA: Wendy, Diana, Vicente y Juanita.*

*A mis amigos de siempre: Manuelito, Lalo, Carlos, Claudia, Iván, Viry, Úrsula, y especialmente a Ady, Alby y la banda K por la estancia en el DF.*

*Y muy especialmente: A MI FAMILIA por su apoyo incondicional y confianza.*

## INDICE

Resumen	<i>i</i>
Abstract	<i>ii</i>
Dedicatoria	<i>iii</i>
Agradecimientos	<i>iv</i>
Índice	<i>v</i>
Índice de cuadros	<i>vii</i>
Índice de figuras	<i>viii</i>
I INTRODUCCIÓN .....	1
Justificación.....	2
II REVISIÓN DE LITERATURA .....	3
Contaminación de ambientes acuáticos.....	3
Principales contaminantes en los ambientes acuáticos .....	4
Parámetros físicos, químicos y microbiológicos .....	4
Metales .....	5
Plaguicidas .....	13
Hidrocarburos .....	15
Factores que influyen en el transporte de contaminantes en el ambiente.....	16
Temperatura .....	16
pH.....	17
Dureza .....	17
Oxígeno disuelto.....	18
Índice de Calidad del agua.....	19
Biomarcadores en peces.....	21
Importancia del uso de biomarcadores en el monitoreo de la contaminación .....	21
Tipos de biomarcadores .....	22
Lipoperoxidación.....	23
Actividad de la acetilcolinesterasa .....	24
Sitio de estudio.....	25
Hipótesis .....	27
III OBJETIVOS.....	27
Objetivo general .....	27

Objetivos particulares.....	27
IV. METODOLOGÍA.....	28
Identificación de los principales contaminantes en la presa La Purísima en agua y sedimento.....	29
Caracterización de agua.....	30
Caracterización de sedimento.....	31
Identificación de especies de peces en la presa.....	33
Evaluación de biomarcadores en peces.....	33
Aclimatación de peces en acuario.....	33
Evaluación de lipoperoxidación y acetilcolinesterasa en peces.....	34
Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua (ICA).....	35
Análisis de metales en tejidos de peces.....	36
V RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
Identificación de los principales contaminantes en la presa La Purísima en agua y sedimento.....	38
Caracterización de agua.....	38
Caracterización de sedimento.....	69
Identificación de peces en la presa.....	94
Evaluación de biomarcadores en peces.....	96
Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua-índice de calidad del agua (ICA).....	98
Análisis de metales en tejidos de peces.....	99
Metales en músculo.....	99
Metales en hueso.....	107
Metales en hígado.....	109
Metales en branquias.....	115
Metales en vísceras.....	117
VI CONCLUSIONES.....	122
VII LITERATURA CITADA.....	124
VIII APÉNDICE.....	136

## INDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>		<b>Página</b>
2.1	Algunos biomarcadores utilizados en organismo acuáticos	23
5.1	Resultados de los parámetros en muestras de agua de la presa La Purísima	40
5.2	Resultados de DBO y SAAM en muestras de agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo	48
5.3	Concentraciones de metales en agua de la presa La Purísima (µg/L)	53
5.4	Matriz de componentes principales para los datos de metales en agua de la presa La Purísima en abril	66
5.5	Matriz de componentes principales para los datos de metales en agua de la presa La Purísima en octubre	68
5.6	Resultados de los parámetros en muestras de sedimento de la presa La Purísima	70
5.7	Resultados de los parámetros en muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril (primer muestreo)	73
5.8	Concentraciones de metales en sedimento de la presa La Purísima	76
5.9	Matriz de componentes principales para los datos de metales en sedimento de la presa La Purísima en abril	92
5.10	Matriz de componentes principales para los datos de metales en sedimento de la presa La Purísima en octubre	93
5.11	Lipoperoxidación (nmoles/mg de proteína) en tejidos de <i>Goodea atripinnis</i> en el control y en los tres diferentes puntos de muestreo de la presa La Purísima (promedio ± desviación estándar)	97
5.12	Actividad de la acetilcolinesterasa (µmol/mg/min-1) en branquias y músculo de <i>Goodea atripinnis</i> en el control y en los tres diferentes puntos de muestreo de la presa La Purísima (promedio ± desviación estándar).	97
5.13	Índice de Calidad del Agua en la presa La Purísima	99
5.14	Concentraciones de metales en músculo de peces ( <i>Oreochromis sp.</i> ) de la presa La Purísima*	101
5.15	Concentraciones de metales en músculo de diferentes especies	103
5.16	Concentraciones de metales en hueso de peces ( <i>Oreochromis sp.</i> ) de la presa La Purísima	108
5.17	Concentraciones de metales en hígado de peces ( <i>Oreochromis sp.</i> ) de la presa La Purísima	110
5.18	Concentraciones de metales en hígado de diferentes especies	112
5.19	Concentraciones de metales en branquias de peces ( <i>Oreochromis sp.</i> ) de la presa La Purísima	116
5.20	Concentraciones de metales en vísceras de peces ( <i>Oreochromis sp.</i> ) de la presa La Purísima	119



## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
2.1	Escala general de calidad del agua (Dinius, 1987)	20
4.1	Diagrama de la estrategia de trabajo seguida para alcanzar los objetivos planteados	28
4.2	Distribución espacial de los puntos de muestreo de agua y sedimento en la presa La Purísima	29
4.3	Distribución espacial de los puntos de muestreo de agua y sedimento en la presa La Purísima utilizados para la elaboración de mapas de contornos	32
4.4	Distribución de los tres puntos de muestreo de agua para la evaluación de biomarcadores en peces en la presa La Purísima	34
4.5	Distribución espacial de los puntos de muestreo de peces en la presa La Purísima	37
5.1	Mapa de contorno de la concentración de sólidos totales en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	41
5.2	Concentración de fósforo soluble en muestras de agua de la presa La Purísima	42
5.3	Mapa de contorno de la concentración de fósforo soluble en las muestras de agua de la presa La Purísima	43
5.4	Concentración de sulfuros totales en muestras de agua de la presa La Purísima	44
5.5	Mapa de contorno de la concentración de sulfuros totales en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	45
5.6	Concentración de carbono en muestras de agua de la presa La Purísima	46
5.7	Concentración de cloruros y sulfatos en muestras de agua de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril)	47
5.8	Mapa de contorno de la concentración de SAAM en las muestras de agua de la presa La Purísima en octubre	49
5.9	Alcalinidad a la fenolftaleína, alcalinidad total y dureza en agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre)	51
5.10	Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	54
5.11	Mapa de contorno de la concentración de arsénico en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	55
5.12	Mapa de contorno de la concentración de cadmio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	56
5.13	Mapa de contorno de la concentración de cromo en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	57
5.14	Mapa de contorno de la concentración de cobre en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	58
5.15	Mapa de contorno de la concentración de mercurio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	59
5.16	Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de agua de la presa La Purísima en abril	60
5.17	Mapa de contorno de la concentración de litio de las muestras de	60

	agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	
5.18	Mapa de contorno de la concentración de níquel de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	61
5.19	Mapa de contorno de la concentración de plomo de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	62
5.20	Mapa de contorno de la concentración de antimonio de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	63
5.21	Mapa de contorno de la concentración de selenio de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	63
5.22	Mapa de contorno de la concentración de vanadio de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	64
5.23	Mapa de contorno de la concentración de zinc de las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	65
5.24	Dendograma obtenido por el método de cluster para los catorce metales en agua de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril)	
5.25	Dendograma obtenido por el método de cluster para los trece metales en agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre)	69
5.26	Mapa de contorno de la concentración de fósforo soluble en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	71
5.27	Mapa de contorno de la concentración de sulfuros totales en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	72
5.28	Mapa de contorno de la concentración de a) carbono total y b) sulfatos en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril	73
5.29	Mapa de contorno de la concentración de a) bromuros y b) cloruros en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril	74
5.30	Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	77
5.31	Mapa de contorno de la concentración de arsénico en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	78
5.32	Mapa de contorno de la concentración de cadmio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	79
5.33	Mapa de contorno de la concentración de cromo en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	81
5.34	Mapa de contorno de la concentración de cobre en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	82
5.35	Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	83
5.36	Mapa de contorno de la concentración de mercurio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	84
5.37	Mapa de contorno de la concentración de litio en las muestras de	84

	sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	
5.38	Mapa de contorno de la concentración de níquel en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	85
5.39	Mapa de contorno de la concentración de plomo en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	87
5.40	Mapa de contorno de la concentración de antimonio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	87
5.41	Mapa de contorno de la concentración de selenio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	88
5.42	Mapa de contorno de la concentración de uranio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	89
5.43	Mapa de contorno de la concentración de vanadio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	89
5.44	Mapa de contorno de la concentración de zinc en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre	91
5.45	Dendograma obtenido por el método de cluster para los quince metales en sedimento de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril)	92
5.46	Dendograma obtenido por el método de cluster para los quince metales en sedimento de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre)	94
5.47	Fotografías de peces identificados en la presa La Purísima: a) <i>G. atripinnis</i> , b) <i>X. variata</i> , c) <i>Chirostoma sp</i> y d) <i>Oreochromis sp</i>	95
5.48	Concentraciones de los trece metales analizados en los diferentes tejidos (hueso, hígado, branquias, músculo y vísceras) de los peces ( <i>Oreochromis sp</i> ) de la presa La Purísima	121

## I INTRODUCCIÓN

En México se tiene un problema creciente en cuanto a la contaminación de agua, esto quiere decir que solo el 20% del agua residual recibe tratamiento lo que significa que la mayor parte de las aguas residuales se descargan en sistemas acuáticos como son los ríos, lagunas, lagos, presas y mares (SEMARNAT, 2005). De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, el 23% de los cuerpos de agua monitoreados en el 2003 se clasificaron en la categoría de contaminados (SEMARNAT, 2005). Los contaminantes encontrados en los cuerpos de agua son muy diversos y pueden incluir metales, plaguicidas, hidrocarburos, detergentes, u otros parámetros, que en valores o niveles inadecuados, pueden ser la causa de efectos negativos para el ecosistema, en estos últimos encontramos a los siguientes: materia orgánica, oxígeno, nutrientes, microorganismos, temperatura, pH, por mencionar algunos (USGS, 2006).

Para evaluar el estado de contaminación que guarda un cuerpo de agua comúnmente se realiza una caracterización fisicoquímica y microbiológica, sin embargo y a pesar de la importancia y rigurosidad que implica la caracterización del sitio, ésta no resulta suficiente para establecer el grado de afectación en un ambiente en particular, así que, hoy en día, dicha caracterización debería ser acompañada con bioensayos y biomarcadores.

La Purísima es una presa que se encuentra en el municipio de Guanajuato, tiene una capacidad de 196 millones de m<sup>3</sup> y su principal afluente es el Río Guanajuato, el cual se considera como la principal vía de transporte de contaminantes generados en la ciudad de Guanajuato. Aunque inicialmente esta presa fue creada para evitar inundaciones en la ciudad de Irapuato y proveer agua para riego a los cultivos de las poblaciones cercanas, alberga dos especies de peces: *Goodea atripinnis* y *Xenotoca variata*, cuya importancia radica en que son endémicas de México. La problemática actual que enfrenta la presa es la baja productividad en peces, siendo una de las hipótesis la presencia de contaminantes aún no identificados. Lo anterior ha hecho indispensable conocer el estado de

contaminación que presenta este cuerpo de agua, y con ello establecer sus efectos sobre la vida acuática y el ecosistema.

### **Justificación**

En México existe muy poca información sobre la caracterización de los diferentes contaminantes que afectan los cuerpos de agua. Además, la mayoría de los estudios se enfocan a determinar el efecto de un contaminante sobre un organismo en particular, sin embargo los contaminantes frecuentemente se encuentran en mezclas complejas y sus efectos en los organismos, en muchas ocasiones, son difíciles de evaluar utilizando únicamente la información generada a partir de los análisis fisicoquímicos del sitio.

Asimismo, los límites máximos permisibles de los contaminantes individuales considerados por las normas mexicanas no resultan ser un parámetro suficiente para evaluar el efecto de estos sobre los organismos vivos.

Este estudio pretende evaluar y caracterizar la contaminación de la presa la Purísima para establecer el tipo y distribución de contaminantes en este cuerpo de agua. Así mismo, el uso de biomarcadores en peces contribuirá a estimar los efectos ocasionados por los contaminantes en estos organismos, información necesaria para complementar la caracterización fisicoquímica y con ello entender la problemática de dicha presa.

## II REVISIÓN DE LITERATURA

### **Contaminación de ambientes acuáticos**

Los sistemas acuáticos están formados por agua, sedimentos y un componente biótico que incluye tanto la flora como la fauna.

El sedimento es el material que se va depositando en el fondo de un cuerpo de agua, esto incluye partículas de suelo transportadas desde la superficie por la erosión, materia orgánica de animales y vegetales en descomposición y otros materiales orgánicos e inorgánicos (EPA, 1993). Los sedimentos son de gran importancia ambiental ya que pueden ser el reservorio o fuente de contaminantes como metales pesados y compuestos orgánicos como hidrocarburos poliaromáticos (PAHs) y plaguicidas (EC, 1999).

En la mayoría de los sistemas acuáticos, los sedimentos suspendidos y la capa superior de la cama del sedimento contienen mayores concentraciones de contaminantes que la columna de agua. Lo anterior se debe a que los compuestos orgánicos del ambiente usualmente son muy poco solubles en agua y a menor solubilidad, es mayor la tendencia de los compuestos orgánicos para absorberse en las partículas del sedimento (EPA, 1993). En algunos casos las concentraciones de compuestos tóxicos encontradas en sedimentos pueden ser más importantes que las concentraciones en agua (EC, 1999).

El sedimento contaminado puede afectar el ambiente y causar pérdidas de recursos importantes como es el agua potable. Además, el hombre puede estar expuesto a los contaminantes a través de la infiltración hacia fuentes de agua potable, acumulación en la cadena trófica y por contacto dérmico directo. Otra consecuencia de esta contaminación es la afectación a los animales de la comunidad bentónica que pueden absorber sustancias tóxicas de sus alrededores y los sedimentos contaminados pueden resultar letales para ellos y afectar la cadena alimenticia de animales superiores como peces, aves y mamíferos inclusive el hombre (EPA, 1993). Los efectos dañinos para las especies de peces pueden ir desde problemas reproductivos, lesiones de hígado y otras histopatologías hasta la muerte (MESO, 2002).

En general, los contaminantes que típicamente son encontrados en los sistemas acuáticos son los hidrocarburos poliaromáticos (PAHs), plaguicidas, metales, nutrientes, microorganismos patógenos, entre otros (EPA, 1993). Los contaminantes entran al sistema hidrológico a través de fuentes puntuales y no puntuales, las primeras están asociadas con puntos específicos de liberación y las segundas están difundidas y ampliamente dispersas (USGS, 2006).

## **Principales contaminantes en los ambientes acuáticos**

### **Parámetros físicos, químicos y microbiológicos**

El nitrógeno y el fósforo son los dos mayores nutrientes de la tierra agrícola que pueden degradar la calidad del agua (EPA, 2003). El fósforo es un nutriente limitante, por lo cual es muy frecuente que se adicione a través de complementos (en sus formas más solubles) a suelos agrícolas deficientes, pero además de ser un nutriente también es un contaminante ambiental. La entrada excesiva de fósforo a sistemas acuáticos puede ayudar a incrementar la productividad primaria (fotosíntesis) y la producción de materia orgánica. Este proceso (eutrofización) puede resultar en el crecimiento de ciertas especies de algas perjudiciales que disminuyen las concentraciones de oxígeno disponible y promueven la producción de metabolitos tóxicos (Traina & Laperchie, 1999; EPA, 2003). Además, se promueve un aumento en la turbidez y el color del agua, y como consecuencia, una menor penetración de luz solar (EPA, 2003; Henry & Heinke, 1999).

Otros contaminantes son los sulfuros, los cuales se encuentran muy relacionados a los metales, estos compuestos se forman como resultado de la reducción bacteriana del sulfato. El agua intersticial de los sedimentos puede contener sulfuro de hidrógeno y ion sulfuro (HS). Estos compuestos pueden ser tóxicos y crear condiciones antiestéticas en agua y en sedimentos (EPA, 1986b). Además, en los sedimentos, los compuestos de sulfuro controlan la disponibilidad de los metales ya que tienden a formar sulfuros metálicos muy insolubles y



complejos polisulfurosos uniéndose a metales tales como Cd, Cu, Ni, Pb y Zn, transformándolos en especies no disponibles (EC, 1999).

Los contaminantes biológicos están representados principalmente por microorganismos patógenos como las bacterias coliformes fecales que pueden ocasionar un problema de salud en los consumidores y usuarios del agua, principalmente enfermedades gastrointestinales. Por esta razón, para la protección de la salud, la normatividad mexicana establece que los coliformes totales no estén presentes en el agua de consumo humano.

## **Metales**

La mayoría de los metales se encuentran de manera natural en la corteza terrestre pero en la actualidad, otra fuente la representan los procesos industriales que ocasionan la liberación de grandes concentraciones de metales al ambiente y en formas más accesibles que las que comúnmente existen en la naturaleza.

Los metales al ser liberados en la atmósfera se adhieren a material particulado y de esta forma son transportados por el viento. Posteriormente son depositados en suelo o cuerpos de agua por la lluvia o deposiciones secas. También pueden alcanzar estos compartimientos ambientales a través de lixiviaciones o escorrentías.

Algunos metales (Ca, Fe, Cu, Na, K, Mg, Zn, Mn y Cr) son importantes como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano; otros elementos (aluminio, silicio, arsénico y níquel) también se encuentran en el cuerpo aunque no se conoce con exactitud su función y otros más (mercurio, cadmio y plata) pueden formar complejos tóxicos para las funciones biológicas (Volke *et al.*, 2005).

Los metales pesados como el plomo, cadmio, cromo, mercurio, entre otros, son de especial interés por sus efectos tóxicos que dependiendo de las condiciones de pH, temperatura y otros factores pueden transformarse a compuestos orgánicos más tóxicos (Bonaventura & Johnson, 1997). Estos metales generalmente no se acumulan en altas concentraciones en los organismos, a excepción del mercurio que en su forma de metilmercurio es capaz de bioacumularse y biomagnificarse a través de la cadena trófica.

Algunos de los metales de mayor importancia ambiental y/o toxicológica se describen a continuación:

### **Aluminio**

El aluminio es el metal más abundante. No se encuentra libre en la naturaleza pues generalmente se combina con oxígeno, silicio y flúor. Estos compuestos de aluminio pueden encontrarse en suelo, minerales, rocas y arcillas. Los compuestos de aluminio son usados en tratamientos de agua y en forros para hornos, se encuentran en productos antiácidos, astringentes, aspirinas, aditivos alimenticios, antitranspirantes, entre otros (ATSDR, 2006).

Los niveles altos de aluminio en el ambiente pueden ser causados por la minería, la producción de aluminio metálico, aleaciones y otros. También se liberan cantidades pequeñas de aluminio de plantas generadoras de energía eléctrica a base de carbón e incineradores (ATSDR, 2006).

Las concentraciones de aluminio en aguas naturales (presas, lagos y corrientes) es generalmente menor a 0.1 mg/L. La exposición al aluminio usualmente no es peligrosa, ocurre mayormente por exposición laboral afectando principalmente los pulmones y el sistema nervioso (ATSDR, 2006).

### **Antimonio**

El antimonio se encuentra en cantidades pequeñas en la corteza terrestre. El antimonio se extrae de minas y se combina con oxígeno. El óxido de antimonio formado es utilizado en la fabricación de textiles y en plásticos como protección antifuego. El antimonio unido al plomo y zinc es utilizado en baterías de plomo, soldaduras, tubos y hojas metálicas, fundiciones, municiones, peltre, entre otros (ATSDR, 1992a).

Las concentraciones de antimonio disueltas en ríos y lagos son muy bajas, usualmente de 5 ppb y en ríos contaminados puede llegar hasta 8 ppb. En el suelo, las concentraciones en sitios no contaminados son menores de 1 ppm (0.48 ppm en promedio) y pueden llegar hasta 9 ppm. Por otra parte, en sitios

contaminados las concentraciones de antimonio alcanza hasta 2550 ppm. Los efectos tóxicos del antimonio se presentan principalmente por exposición laboral por inhalación, vía oral o dérmica. Estos efectos respiratorios abarcan neumoconiosis, alteración en la función pulmonar, bronquitis crónica, enfisema crónico, tuberculosis inactiva entre otros. También puede tener efectos oculares y en piel (conjuntivitis y dermatitis). Adicionalmente, puede ser carcinogénico en ratas (ATSDR, 1992a).

### **Arsénico**

El arsénico es un elemento de amplia distribución en la corteza terrestre. Se encuentra comúnmente combinado con oxígeno, cloruro y sulfuro (arsénico inorgánico) y con carbono e hidrógeno (arsénico orgánico). El arsénico se libera durante el calentamiento de las menas y en menores cantidades, por plantas generadoras de electricidad a base de carbono, residuos y erupciones volcánicas. El arsénico es usado principalmente como preservador de madera, plaguicida, aditivo en alimento de animales, en las baterías ácidas de plomo de los automóviles y como semiconductores y diodos emisores de luz (ATSDR, 2007a; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de arsénico en suelo varían ampliamente en un intervalo de 1 a 40 ppm con un nivel promedio de 3 a 4 ppm. En aguas naturales superficiales y subterráneas, las concentraciones de arsénico son de 1 ppb pero pueden exceder 1 000 ppb en áreas contaminadas. En concentraciones altas, el arsénico inorgánico vía oral puede ocasionar la muerte (en 60 000 ppb). En dosis bajas (300 a 30 000 ppb) puede producir irritación de estómago e intestinos. En exposiciones a largo tiempo, produce patrones de cambios en la piel y puede llegar a producir cáncer de piel. Además, incrementa el riesgo de padecer cáncer de hígado, pulmón y vejiga (ATSDR, 2007a; Volke *et al.*, 2005).

### **Cadmio**

El cadmio es un elemento que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, usualmente se encuentra combinado con oxígeno, cloro o

sulfuro. El cadmio se usa ampliamente en la industria, principalmente en la fabricación de baterías, pigmentos, recubrimientos de metales, plásticos, PVC y aleaciones con metales. El cadmio se libera al ambiente por la intemperización de las rocas, por incendios forestales y volcanes. La liberación antropogénica de cadmio se produce por la minería, por el uso de combustibles fósiles y por la incineración de residuos domésticos. Además, los fertilizantes frecuentemente contienen cadmio que entra al suelo cuando son aplicados a los cultivos (ATSDR, 1999a; Volke *et al.*, 2005).

Los niveles de cadmio en la mayoría de las fuentes de agua potable se encuentran por debajo de 1 ppb y el nivel promedio de cadmio en suelos no contaminados es de 250 ppb. Aguas contaminadas alcanzan concentraciones de hasta 6 ppm y suelos contaminados alcanzan concentraciones de 4 ppm. Si el cadmio es inhalado puede ocasionar irritación del tejido respiratorio. Además, es tóxico para un amplio intervalo de organismos y tejidos aunque sus blancos principales son el riñón y el hígado. En humanos y animales, la exposición crónica de cadmio por la ruta inhalatoria u oral produce daño celular, proteinuria, glicosuria, enzimuria y decremento en la absorción de fosfato (ATSDR, 1999a; Volke *et al.*, 2005).

### **Cromo**

El cromo se encuentra de manera natural en rocas, animales, plantas, suelo, polvo y gases volcánicos. Está presente en diferentes formas (valencia 0, 3 o 6), el cromo (III) es un nutriente esencial y el resto son producidos generalmente por procesos industriales. El cromo (0) es usado en la fabricación del acero y otras aleaciones; el cromo (III) es utilizado para recubrimiento de ladrillos en hornos industriales de alta temperatura, para hacer aleaciones y otros compuestos químicos. Los compuestos de cromo (III y VI) son usados para recubrimientos, en la fabricación de pigmentos y colorantes, en preservadores de madera, como inhibidores de corrosión y en textiles (ATSDR, 2000; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de cadmio en ríos estadounidenses se encuentran en intervalos de <1 a 30 µg/L con un promedio de 10 µg/L y en suelos el intervalo

de concentración va de 1 a 2 000 mg/kg con un promedio de 37 mg/kg. El cromo (VI) es la especie más tóxica, puede ocasionar irritaciones en la nariz y puede ser dañino para el sistema respiratorio y el sistema inmunológico. Además, exposiciones a largo plazo se han asociado a cáncer de pulmón (ATSDR, 2000; Volke *et al.*, 2005).

### **Cobre**

El cobre se encuentra de manera natural en rocas, suelo, agua, sedimento y aire (en niveles bajos), también puede estar en plantas y animales ya que es un elemento esencial a bajos niveles. El cobre es utilizado ampliamente para formar aleaciones, en la fabricación de láminas de metal, tuberías, alambres y otros productos metálicos. También es usado en la agricultura para el tratamiento de enfermedades y como preservador de madera (ATSDR, 1994; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de cobre en cuerpos de agua como lagos y ríos se encuentran en intervalos de 0.5 a 1 000 ppb con un promedio de 10 ppb. El suelo generalmente contiene entre 2 y 250 ppm de cobre. El exceso en el consumo de cobre puede provocar efectos gastrointestinales como náusea, vómito y dolor abdominal. Además, en exposiciones laborales se le ha relacionado con fibrosis pulmonar y daño al hígado (necrosis y fibrosis) (ATSDR, 1994; Volke *et al.*, 2005).

### **Plomo**

El plomo es un metal pesado que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, aunque es raro encontrarlo en la naturaleza como metal, frecuentemente se encuentra combinado con dos o más elementos. El plomo principalmente es utilizado en las baterías de automóviles pero también es consumido para la fabricación de tuberías, baterías, pesas, pigmentos, coberturas de cables y láminas usadas como protección de radiación (ATSDR, 2007b; Volke *et al.*, 2005).

La concentración de plomo en agua superficial es muy variable. En Estados Unidos los niveles promedio son de 3.9 µg/L aunque se han encontrado

concentraciones tan altas como 890 µg/L. En sedimentos de ríos, los valores estimados son de 25 mg/kg pero se han encontrado concentraciones que van de 440 a 1 000 mg/kg. El plomo tiene efectos sobre el sistema nervioso. Puede causar debilidad en dedos, muñecas y tobillos; incrementos en la presión y anemia. Además, a concentraciones altas, puede dañar severamente el cerebro y riñón. En ratas y ratones la exposición a plomo ha desarrollado tumores de riñón. El plomo se acumula en huesos e interfiere en el metabolismo del calcio (WHO, 2006; ATSDR, 2007b; Volke *et al.*, 2005).

### **Mercurio**

El mercurio está presente de manera natural en el ambiente en tres formas: mercurio metálico (elemental), mercurio inorgánico y mercurio orgánico. El metilmercurio (una forma orgánica) es de mayor relevancia ambiental debido a que es capaz de bioacumularse en peces y mamíferos hasta alcanzar niveles mayores que el agua que los rodea. El metilmercurio es usado en la producción de cloro gas, sosa cáustica y en la extracción de oro. También es utilizado en termómetros, barómetros, baterías e interruptores eléctricos. Algunos compuestos orgánicos de mercurio son utilizados como fungicidas y algunas sales inorgánicas como cremas aclarantes, agente antiséptico y desinfectante (ATSDR, 1999b; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de mercurio en agua dulce no contaminadas son menores de 5 ng/L de mercurio total. Existen varios estudios donde se han detectado concentraciones de mercurio en peces, mayores que los niveles de alerta permitidos por las regulaciones estadounidenses, incluso llegan a registrarse concentraciones en intervalos de 1 a 6.9 ppm (Baird, 2001; Bonaventura & Johnson, 1997). El sistema nervioso es muy sensible al mercurio, la gente que llega a comer peces contaminados con metilmercurio presenta daños en cerebro y riñón. Además, la exposición a mercurio metálico puede ocasionar daño permanente al cerebro (ATSDR, 1999b; Volke *et al.*, 2005).

## **Níquel**

El níquel se encuentra en el ambiente combinado con oxígeno o sulfuro principalmente aunque también se combina con otros metales como el hierro, cobre, cromo y zinc. La mayor parte del níquel es utilizado en la fabricación de acero inoxidable y las aleaciones de níquel con otros metales son utilizadas en joyería, monedas y en la industria para la fabricación de válvulas e intercambiadores de calor, en recubrimientos, cerámicas, baterías y catalizadores (ATSDR, 2005a).

Las concentraciones de níquel en agua dulce no contaminada son de 0.3 µg/L. En suelo, las concentraciones reportadas se encuentran en un intervalo de 4 a 80 ppm. El efecto del níquel sobre la salud en humanos principalmente se expresa en reacciones alérgicas. También puede producir bronquitis crónica y cáncer de pulmón (ATSDR, 2005a).

## **Selenio**

El selenio está ampliamente distribuido en la corteza terrestre, es muy común en rocas y suelo. Se encuentra frecuentemente en el ambiente en su forma elemental pero se combina con otras sustancias. El selenio elemental es producido comercialmente como subproducto en la refinación del cobre y se usa en la manufactura de aparatos fotográficos, plásticos, pinturas, shampoo, suplementos alimenticios, fungicidas y ciertos tipos de vidrio (ATSDR, 2003; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones encontradas en aguas superficiales y subterráneas son muy bajas, menores de 0.010 mg/L. El selenio puede ocasionar fatiga, irritación de las membranas mucosas y bronquitis (ATSDR, 2003; Volke *et al.*, 2005).

## **Plata**

La plata es un elemento raro. Frecuentemente está depositada como una mena en asociación con otros elementos. La plata se libera al ambiente y agua a través de procesos naturales como es la intemperización de rocas y la erosión de



suelos. Las fuentes más importantes de plata atmosférica de actividades humanas incluyen el procesamiento de las menas, refinación del acero, manufactura del cemento, incineración de combustibles fósiles, y la incineración de residuos municipales. La plata se utiliza principalmente en joyería, equipo electrónico, amalgamas dentales y material fotográfico (ATSDR, 1990).

En aguas superficiales, las concentraciones de plata son de 0.2 a 2.0 ppb y en suelo son de 0.2 a 0.3 ppm. Los componentes de la plata pueden ocasionar cambios en la coloración de la piel (argiria) en personas que han comido o respirado compuestos de plata por un periodo muy largo. Además, la plata puede producir alergias al contacto con la piel en personas sensibles (ATSDR, 1990).

### **Uranio**

El uranio es un elemento radioactivo natural. Se encuentra en concentraciones muy pequeñas en la naturaleza. Las rocas, el suelo, el agua superficial y subterránea, aire, plantas y animales pueden contener diferentes cantidades de uranio. El uso principal del uranio es en plantas nucleares, en la fabricación de helicópteros y aviones. También es usado para escudos protectores en tanques y en la fabricación de misiles y armas nucleares (ATSDR, 1999c).

Las concentraciones de uranio en la corteza terrestre se encuentran en intervalos de 2 a 4 ppm. El uranio puede ocasionar enfermedades de riñón y está ligado a cáncer. Dosis muy altas de uranio pueden ocasionar problemas reproductivos en animales además de fibrosis y anomalías cardiovasculares (ATSDR, 1999c).

### **Vanadio**

El vanadio se encuentra frecuentemente unido a otros elementos como el oxígeno, sodio, sulfuro y cloruro. El vanadio se libera al ambiente durante la quema de combustibles fósiles principalmente y se utiliza en la fabricación del acero, plásticos, cerámica y otros químicos. Además, se encuentra presente en el petróleo crudo (ATSDR, 1992b; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de vanadio encontradas en agua dulce se encuentran en intervalos de 0.3 a 200 µg/L. La exposición a polvos de vanadio puede producir irritación de ojos y pulmones (ATSDR, 1992b; Volke *et al.*, 2005).

### **Zinc**

El zinc se utiliza principalmente para cubrir el acero y el hierro evitando así la corrosión, además se utiliza en la fabricación de baterías secas (ATSDR, 2005b; Volke *et al.*, 2005).

Las concentraciones de zinc en aguas superficiales se encuentran en un intervalo de 0.002 a 50 mg/L aunque el promedio es menor a 0.05 mg/L. El exceso en la ingesta de zinc puede ocasionar diarrea, vómito y a largo plazo anemia y daño a páncreas. En ratas, concentraciones altas de zinc ocasionan infertilidad (ATSDR, 2005b; Volke *et al.*, 2005).

### **Plaguicidas**

Los plaguicidas convencionales incluyen cuatro grupos mayores: herbicidas, insecticidas, fungicidas y nematicidas (EPA, 2003). Todos los plaguicidas químicos poseen la propiedad común de bloquear procesos metabólicos vitales de los organismos y presentan las siguientes propiedades (Baird, 2001):

- Estabilidad a la descomposición o degradación en el medio ambiente
- Baja solubilidad en agua
- Alta solubilidad en medios liposolubles

La alta persistencia de los plaguicidas en el ambiente es un factor que contribuye a aumentar el riesgo de exposición de los organismos a estos compuestos. Una vez que los plaguicidas se introducen en los organismos, debido a su liposolubilidad pueden almacenarse en los tejidos adiposos y de esta forma pasar a través de la cadena trófica hasta organismos superiores.

Los plaguicidas también pueden clasificarse de acuerdo a su composición química en organoclorados, organofosforados y carbamatos. Los organoclorados son los más persistentes de los plaguicidas. Los organofosforados no son persistentes sin embargo, son mucho más tóxicos a los seres humanos y a otros mamíferos que los organoclorados. Son tóxicos a los insectos, ya que inhiben a las enzimas del sistema nervioso interrumpiendo el transporte de los mensajes entre las células por la molécula de acetilcolina (Baird, 2001).

El modo de operar de los carbamatos es similar a los organofosforados; difieren en que es el átomo de carbono, en lugar del fósforo, el que ataca a la enzima que destruye la acetilcolina. Son compuestos de vida corta ya que reaccionan con agua y se descomponen para dar productos secundarios simples e inofensivos (Baird, 2001).

Los efectos de los plaguicidas clorados han sido más documentados, en especial el DDT (1, 1, 1 – tricloro-2, 2,-bis (4-clorofenil) etano) el cual ha sido ligado a cáncer de seno (Wolf & Toniolo, 1995), el hexaclorobenceno se ha comprobado que origina cáncer de hígado en roedores de laboratorio igual que el toxafeno que es extremadamente tóxico para los peces (Baird, 2001). Por otra parte, otros plaguicidas clorados como el endosulfán provoca cambios en los organismos acuáticos (Hose *et al.*, 2002). En la actualidad, varios de estos plaguicidas (aldrín, clordano, DDT, dieldrín, heptacloro, hexaclorobenceno, lindano) están regulados a través del Convenio de Róterdam (2005) y la Convención de Estocolmo (2001) para tratar de eliminar su producción y uso.

Los plaguicidas son liberados al ambiente principalmente por su aplicación a las tierras de cultivo, para el control de plagas no agrícolas en jardines, céspedes y áreas comerciales y por emisiones industriales (USGS, 2006; PSTA, 2003).

Las rutas primarias del transporte de plaguicidas a los sistemas acuáticos son a través de la aplicación directa a los sistemas, la escorrentía (las pérdidas de los plaguicidas mediante escorrentías generalmente puede representar hasta un 5 % de la cantidad que se aplica), la dispersión aérea, lixiviación, volatilización y

deposición atmosférica, después los plaguicidas pueden pasar a la biota y posteriormente moverse a través de la cadena alimenticia (EPA, 2003).

Los plaguicidas pueden ser transportados a cuerpos de agua receptores en forma disuelta o adheridos a sedimentos (EPA, 2003). Una vez que los plaguicidas entran al agua superficial, su velocidad de degradación es menor en comparación con la degradación que sufren en suelo. Una porción del plaguicida puede absorberse a los sedimentos y permanecer ahí hasta que los sedimentos se resuspendan y el contaminante regrese al agua (EPA, 2003).

## **Hidrocarburos**

Los hidrocarburos poliaromáticos (PAHs) contienen dos o más anillos aromáticos unidos a átomos de carbono e hidrógeno (WHO, 2006). Los PAHs son un grupo de compuestos químicos que se forman durante la combustión incompleta de combustibles, aceites, gas, madera, residuos y otras sustancias orgánicas (ATSDR, 1995).

Existen más de 100 diferentes PAHs. Algunos son usados en medicinas y otros en la fabricación de colorantes, plásticos y plaguicidas; otros, están contenidos en el asfalto. Los PAHs más peligrosos son: acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(e)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(g,h,i)perileno, benzo(j)fluoranteno, benzo(jk)fluoranteno, criseno, debenzo(a,h)antraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno(1,2,3)pireno, fenantreno y pireno.

La mayoría de los PAHs que se liberan a la atmósfera provienen de volcanes, incendios forestales, emisiones de automóviles e incineración de madera. En el aire, los PAHs son adsorbidos por partículas que los transportan a través de grandes distancias y son removidos de la atmósfera a través de la lluvia o deposición seca. Los PAHs pueden introducirse al agua superficial a través de descargas de aguas de plantas de tratamiento de aguas residuales o industriales o liberarse a suelos por escapes de sitios de residuos peligrosos. Los PAHs son removidos de las aguas superficiales por la volatilización o adsorción de partículas sedimentables. Estos compuestos son transformados mediante procesos de

oxidación química, fotooxidación y metabolismo microbiano. En suelo y sedimentos el metabolismo microbiano es el principal proceso de degradación de PAHs.

Las concentraciones de PAHs en cuerpos de agua superficiales se encuentran en el intervalo de 4.7 a 600 ng/L. En sedimentos, se han reportado concentraciones iguales y/o menores a 500 µg/kg en peso seco.

Algunos PAHs provocan tumores y efectos negativos en la reproducción en animales. En humanos pueden afectar la piel, fluidos corporales y sistema inmunológico, además de ser carcinogénicos en animales.

### **Factores que influyen en el transporte de contaminantes en el ambiente**

Las entidades fisicoquímicas que influyen de forma importante en el transporte y destino de los contaminantes en ambientes acuáticos son la temperatura, el pH, dureza, oxígeno disuelto (OD), luz, alcalinidad, salinidad, materia orgánica suspendida y disuelta (EC, 1999).

#### **Temperatura**

Este parámetro puede afectar varios procesos químicos en el agua. A temperaturas altas, el crecimiento de la vida acuática es más rápido y la descomposición de materia orgánica se acelera (Henry & Heinke, 1999). En algunos casos, las temperaturas incrementan las velocidades de reacción entre los contaminantes y compuestos celulares con lo cual también puede incrementar su toxicidad (EC, 1999; EPA, 1998b), además tasas metabólicas mayores crean una mayor demanda de oxígeno, y en los peces significa una mayor cantidad de agua que pasa a través de las branquias y consecuentemente, un aumento en la tasa de consumo de tóxicos (EC, 1999). Asimismo, a mayor temperatura, la capacidad del agua para disolver el oxígeno y dióxido de carbono es sustancialmente menor y los compuestos volátiles pasan a la atmósfera más rápidamente (EC, 1999; Henry & Heinke, 1999). En el caso de los sedimentos, la acumulación de metales se acelera o retrasa con un incremento en la temperatura (EC, 1999). Además de lo anterior, la temperatura del agua es de suma

importancia en la vida de los peces y otros organismos acuáticos ya que influye en su distribución, tasa de crecimiento y supervivencia, en los patrones de migración, maduración de huevos, eventos de incubación, habilidad para competir y resistencia a los parásitos, enfermedades y contaminantes (EPA, 2003).

### **pH**

La concentración de ion-hidrógeno es probablemente el modificador fisicoquímico más importante especialmente para los metales, pero también para el amoníaco, nutrientes, algunos compuestos orgánicos (fenoles) y otras sustancias ionizables para las cuales las formas no polares y no disociadas resultan ser más tóxicas (EC, 1999; EPA, 1990). En aguas ácidas, los metales tienden a ser más solubles, y por lo tanto más disponibles y tóxicos al igual que el cianuro de hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. Por el contrario, las bases se convierten más tóxicas en aguas alcalinas (EC, 1999; EPA, 1990). Este parámetro también puede afectar la presencia y actividad de poblaciones microbianas que intervienen en la transformación de contaminantes (EPA, 1998b) ya que la mayoría de los animales acuáticos se desarrollan en un pH de 6 a 9, este intervalo es usualmente conservado por los carbonatos y bicarbonatos (EPA, 1990).

### **Dureza**

La toxicidad de los metales es mayor en aguas suaves y disminuye significativamente cuando aumenta la dureza ya que la forma de carbonatos insolubles y los iones de calcio y magnesio compiten con metales por las membranas superficiales de los organismos, reduciendo la biodisponibilidad de los metales. De esta forma, las concentraciones de los metales que podrían ser letales agudos en aguas suaves, en aguas duras causarían solo efectos subletales o no observables (EC, 1999).

## **Oxígeno disuelto**

Es el aceptor de electrones más favorecido termodinámicamente que utilizan los microorganismos para la degradación de los compuestos orgánicos ya sean de origen natural o antropogénico. Las bacterias anaerobias generalmente no pueden sobrevivir a concentraciones de oxígeno disuelto mayores de 0.5 mg/L (EPA, 1998b). Cuando se presenta una disminución en la concentración del oxígeno disuelto, los microorganismos anaerobios usan el nitrato como un aceptor de electrones, seguido del hierro (III), del sulfato y finalmente del dióxido de carbono (EPA, 1998b). La concentración de oxígeno libre puede ser baja o no encontrarse en sedimentos y en las capas de agua cercanas al sedimento. Una concentración baja de oxígeno disuelto puede incrementar la toxicidad de los contaminantes en agua, sedimentos y para los peces debido a que genera una situación de estrés adicional que debilita a los organismos (EC, 1999).

Existen otros factores que afectan el transporte y destino de los contaminantes como son el contenido de materia orgánica que puede absorber y reducir la toxicidad de algunas sustancias (EC, 1999) y el color que limita la penetración de la luz y puede reducir los niveles de OD con sus respectivas consecuencias (Henry & Heinke, 1999).

En sedimentos, el tamaño de partícula influye en la movilidad y comportamiento de los tóxicos. Las sustancias orgánicas y metales se enlazan más fácilmente a limo y arcillas que a arenas gruesas y gravas debido a que las partículas finas tienen una mayor área superficial por volumen y porque tienen cargas superficiales negativas (EC, 1999). De esta forma, las partículas de diámetro más pequeño frecuentemente presentan una mayor concentración de contaminantes.

Así también, existen características específicas de los organismos que influyen sobre el efecto de los contaminantes en ellos como son (EC, 1999; EPA, 1994c):

- Ciclos de vida. La sensibilidad a los tóxicos varía de acuerdo con el estadio de vida de los organismos. En la mayoría de los organismos, los gametos y los estadios muy jóvenes son los más sensibles



- Estado físico y nutricional de los organismos. Los organismos con deficiencias nutricionales o físicas son más susceptibles a ser afectados por los contaminantes.
- Sexo. En algunas ocasiones, debido a las diferencias hormonales, los contaminantes pueden afectar más a un sexo que a otro.
- Excreción y metabolismo diferencial. Algunos organismos tienen la capacidad de metabolizar ciertos contaminantes sin asimilarlos en sus tejidos o sin que sean afectados por los mismos.
- Nivel de la cadena alimenticia. Algunos organismos pueden acumular contaminantes en sus tejidos (especialmente en el tejido adiposo) sin ocasionarles un efecto, pero cuando este organismo es consumido por otro, las cantidades de contaminantes se bioacumulan y podrían tener un efecto mayor en el siguiente nivel trófico.

### **Índice de Calidad del agua**

El índice de calidad del agua (ICA) es una forma de agrupación simplificada de algunos parámetros indicadores de un deterioro en la calidad del agua (Dinius, 1987).

Uno de los criterios de ICA de mayor aceptación es el propuesto por Dinius (1987) que agrupa diferentes parámetros de forma multiplicativa y asigna diferente peso de importancia para cada parámetro de acuerdo a la relación entre la cantidad de estos contaminantes en el agua y el nivel de la contaminación asociado a cada uno de ellos. Los once parámetros considerados por Dinius (1987) para el cálculo del índice de calidad del agua son: oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), coliformes, *E. coli*, pH, alcalinidad, dureza, cloruros, conductividad eléctrica, temperatura y color.

En base a la determinación del índice de calidad, Dinius (1987) propone una escala de calidad del agua de acuerdo a su uso (figura 2.1).

Nivel de contaminación (mejor= 100)	Usos del agua					
	Abastecimiento público	Recreación	Peces	Moluscos	Agricultura	Industria
100	No requiere purificación	Aceptable para todos los deportes acuáticos	Aceptable para todos los peces	Aceptable para todos los moluscos	No requiere purificación	No requiere purificación
90	Requiere purificación menor				Se requiere purificación menor para cultivos que requieren agua de alta calidad	Se requiere purificación menor para industrias que requieren agua de alta calidad
80	Se requiere tratamiento más extensivo				Contaminada Aún es aceptable en el conteo de bacterias	Aceptable excepto para peces sensibles
70		Dudosa para peces sensibles	Dudosa para moluscos sensibles			
60		Dudosa	Dudosa para el contacto con el agua	Solo para peces resistentes	Solo para peces resistentes	Requiere tratamiento extensivo para la mayoría de los cultivos
50	No aceptable	Sin contacto con el agua (solo paseos en bote)	Solo para peces más resistentes	Solo para peces más resistentes	Solo para cultivos muy resistentes	Solo para industrias burdas
40		Señal de contaminación	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable
30		Contaminada				
20	0	Inaceptable				
10						
0						

Figura 2.1. Escala general de calidad del agua (Dinius, 1987).

## **Biomarcadores en peces**

Un biomarcador es “cualquier medición que refleje una interacción entre un sistema biológico y un peligro potencial, el cual puede ser químico, físico o biológico” (WHO, 1993). Los biomarcadores pueden ser de distintas clases: de exposición, de efecto y de susceptibilidad.

Los biomarcadores de exposición son sustancias exógenas, sus metabolitos o el producto de una interacción entre un agente xenobiótico y alguna molécula o célula blanco que es medida en un compartimento dentro del organismo (WHO, 1993). Un biomarcador de efecto es una alteración medible de comportamiento, fisiológica, bioquímica o de otro tipo dentro de un organismo y que dependiendo su magnitud, puede ser asociada con un impedimento de salud o enfermedad (WHO, 1993). Finalmente, un biomarcador de susceptibilidad es un indicador de una habilidad inherente o adquirida de un organismo para responder a los cambios de exposición a xenobióticos específicos (WHO, 1993).

### **Importancia del uso de biomarcadores en el monitoreo de la contaminación**

La importancia del uso de biomarcadores en el monitoreo de la contaminación recae principalmente en las características que estos presentan, las más significativas son las siguientes (Sarkar *et al.*, 2006; Lam & Gray, 2003):

- Identifican las interacciones entre los contaminantes y los organismos y miden efectos subletales, y la detección temprana de los efectos proveen señales de alarma para remediar o para tomar acciones preventivas.
- Pueden detectar la presencia de contaminantes conocidos y desconocidos.
- Proveen una medición espacial y temporal integrada de contaminantes biodisponibles.
- Pueden ayudar en el establecimiento de rutas importantes de exposición mediante la aplicación de especies a diferentes niveles tróficos y estos pueden tener como objetivo esquemas de monitoreo prioritarios y estrategias para la intervención o remediación.

- Son aplicables a estudios de laboratorio y campo. El desarrollo de los biomarcadores involucra experimentación de laboratorio para identificar primero las respuestas potenciales y establecer los mecanismos causales antes de la aplicación en campo.

El uso de biomarcadores en peces es una herramienta útil para estimar los efectos ocasionados por los contaminantes (van der Oost *et al.*, 2003). Los biomarcadores indican si los organismos han estado expuestos a contaminantes (biomarcadores de exposición) y/o la magnitud de la respuesta del organismo al contaminante (biomarcadores de efecto o estrés) (Sarkar *et al.*, 2006).

### **Tipos de biomarcadores**

Existen varios tipos de biomarcadores como el nivel de lipoperoxidación, la actividad de la catalasa, la inducción del citocromo P4501A, la integridad del DNA, la actividad de la acetilcolinesterasa y la inducción de la metalotioneína que han sido utilizados ampliamente para evaluar la exposición o el efecto en varias especies de organismos marinos (mejillones, almejas, ostras, caracoles, peces, entre otros) de varios contaminantes tanto orgánicos como metales (Sarkar *et al.*, 2006; Ferreira *et al.*, 2005; Lau & Wong, 2003; Matozzo *et al.*, 2005; Pfeifer *et al.*, 2005; Lau *et al.*, 2004). En el cuadro 2.1 se describen algunos de los biomarcadores utilizados en organismos acuáticos.

Cuadro 2.1. Algunos biomarcadores utilizados en organismos acuáticos

Biomarcador	Importancia
Metalotioneínas	Son biomarcadores de exposición. Son proteínas no enzimáticas involucradas en la detoxificación de metales al unirse a ellos. Generalmente son inducidas por metales tóxicos como Cd, Hg y Cu. La concentración de metalotioneínas aumenta proporcionalmente al contenido de metales.
Citocromo P4501A	Es importante en la biotransformación de contaminantes como dioxinas, furanos, bifenilos policlorados e hidrocarburos poliaromáticos. La inducción del citocromo P4501A se incrementa con la presencia de estos contaminantes.
Integridad del DNA	La integridad del DNA es afectada por agentes genotóxicos como los metales o por radiaciones que pueden actuar a través del rompimiento de las hebras de DNA, pérdida de mutación y formación de aductos de DNA. De tal forma que a mayor presencia de contaminantes, la integridad del DNA es menor.
Actividad de la catalasa	Es un biomarcador de exposición. Es una enzima antioxidante intracelular involucrada en los sistemas de defensa contra los radicales generados por los contaminantes oxidativos ambientales que degrada el H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> a H <sub>2</sub> O y O <sub>2</sub> . La actividad de la catalasa aumenta al incrementar la presencia de dichos radicales.

Fuente: van der Oost *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2004; Sayeed *et al.*, 2003; Lau *et al.*, 2004; Ferreira *et al.*, 2005.

### Lipoperoxidación

Varios estudios indican que la toxicidad de cierto contaminante en organismos acuáticos puede estar asociada a un incremento en la producción de especies reactivas al oxígeno, las cuales producen daño oxidativo (Ferreira *et al.*, 2005). El daño oxidativo puede ocurrir cuando los sistemas antioxidantes y detoxificantes son deficientes y no son capaces de neutralizar a los intermediarios activos producidos por xenobióticos y sus metabolitos (Ferreira *et al.*, 2005). Por lo anterior, la lipoperoxidación se ha usado para analizar el efecto de diversos contaminantes.

Aunque se ha observado un incremento en la lipoperoxidación en el hígado de organismos expuestos a contaminantes como PAHs, bifenilos

policlorados (PCBs) y otros (Ferreira *et al.*, 2005), también se utilizan otros tejidos como el riñón y branquias de peces para evaluar la lipoperoxidación (Sayeed, 2003).

### **Actividad de la acetilcolinesterasa**

La acetilcolinesterasa (AChE) es responsable de hidrolizar el neurotransmisor acetilcolina en colina y ácido acético. La inhibición de la AChE provoca la acumulación de acetilcolina y la transmisión nerviosa se interrumpe (Matozzo *et al.*, 2005). La actividad de la acetilcolinesterasa ha sido ampliamente utilizada como biomarcador de exposición a agentes neurotóxicos como plaguicidas organofosforados y carbamatos (Rickwood & Galloway, 2004). Además, se ha encontrado que contaminantes como el cadmio, mercurio, plomo y cobre también inhiben la actividad de la acetilcolinesterasa (Sarkar *et al.*, 2006).

La actividad de la acetilcolinesterasa puede evaluarse en diferentes tejidos donde se puede encontrar en diferentes concentraciones (Lau & Wong, 2003), también se han encontrado diferencias estacionales de actividad de acetilcolinesterasa en almejas probablemente causadas por la diferencia de temperaturas, periodos reproductivos y concentraciones de salinidad (Matozzo *et al.*, 2005; Pfeifer *et al.*, 2005; Lau *et al.*, 2004)

En México ya se han realizado algunos estudios de biomarcadores en varias especies de peces, principalmente goodeidos y truchas (Tejeda *et al.*, 2007; López *et al.*, 2006; Favari *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2002) evaluando principalmente los niveles de lipoperoxidación, actividad de acetilcolinesterasa y metalotioneínas encontrando correlaciones directas entre estos biomarcadores y la calidad del agua de los sistemas acuáticos. Sin embargo, la respuesta de los biomarcadores puede resultar afectada por factores bióticos y abióticos, tales como la estacionalidad, la temperatura, el sexo, el estado nutricional y la talla de peces y moluscos (Van *et al.*, 2004; Matozzo *et al.*, 2005; Pfeifer *et al.*, 2005; Lau *et al.*, 2004). Además, como es el caso del citocromo P4501A, no siempre es posible tener una relación lineal dosis-respuesta entre la concentración de ciertos químicos y el contenido ó actividad del citocromo en un ambiente natural donde

existen una mezcla de inductores e inhibidores del citocromo que actúan de manera simultánea (Sarkar *et al.*, 2006).

### **Sitio de estudio**

La presa La Purísima se encuentra en el municipio de Guanajuato e inició operaciones en 1980 para proteger de inundaciones a la ciudad de Irapuato y zonas agrícolas y pecuarias aledañas, además de abastecer el distrito de riego número 11 (Periódico Oficial del gobierno del Estado de Guanajuato, 2005). La Subcuenca La Purísima irriga alrededor de 4 500 Ha en el municipio de Irapuato y Guanajuato (Medina *et al.*, 2004), en el estado de Guanajuato, el cual dedica alrededor del 60 % de su territorio para uso agrícola (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2003) y con una importante actividad minera (Volke *et al.*, 2005). Sus coordenadas son 21°00'03" latitud norte y 101°38'26" longitud oeste. La zona de la Presa forma parte del acuífero Silao- Romita, pertenece a la cuenca del Río Lerma-Salamanca de la Región Lerma – Chapala (INEGI) y recibe los afluentes de los Ríos Guanajuato, Chapín, y la Trinidad (Periódico Oficial del gobierno del Estado de Guanajuato, 2005). El Río Guanajuato atraviesa la ciudad de Guanajuato y distintos suelos agrícolas, de esta forma transporta diversos contaminantes generados en estos lugares por las diversas actividades que allí tienen lugar.

La presa La Purísima tiene una capacidad de almacenamiento de 195.7 Mm<sup>3</sup>, siendo la de mayor capacidad en el estado, después de la presa Solís (1 217 Mm<sup>3</sup>) y de la presa Ignacio Allende (251 Mm<sup>3</sup>) (Flores & Scott, 2000). Todas estas presas están localizadas en la cuenca del Río Lerma que fue la segunda cuenca con los valores más altos de contaminación de acuerdo al índice de calidad de agua (solo superada por la cuenca del río Laja) para el periodo 2000-2002 (Gobierno del estado de Guanajuato 2003).

La zona de la presa La Purísima es el hábitat de más de 200 especies de aves terrestres y acuáticas entre las que se encuentran especies sujetas a protección especial como la aguililla pechirroja (*Buteo lineatus*) y el halcón peregrino (*Falco peregrinus*) y especies amenazadas como el pato mexicano

(*Anas platyrhynchos diaza*) (Periódico Oficial del gobierno del estado de Guanajuato, 2005). Por lo anterior, la presa La Purísima y su zona de influencia fue declarada Área Natural Protegida en el 2005 por el gobierno del estado de Guanajuato (Periódico Oficial del gobierno del estado de Guanajuato 2005) en la categoría de Área de Uso Sustentable y de acuerdo a esta declaratoria, las actividades permitidas en la presa son la pesca, la agricultura, las de tipo recreativo o turismo de bajo impacto, sujetas a ciertos lineamientos (Medina *et al.*, 2004).

La subcuenca de La Purísima (alrededor de 50 000 ha) presenta procesos de degradación como son la deforestación, el sobrepastoreo, los incendios provocados, el saqueo de recursos forestales, la venta de tierra para alfarería y construcción de tabiques, la erosión hídrica, la pérdida de fertilidad de los terrenos y la acumulación de sustancias tóxicas por desechos de minería. Asimismo, en la presa La Purísima se han determinado diversos contaminantes en agua como son principalmente la presencia de coliformes (Sandoval, 1987), materia orgánica, fósforo y metales, en especial arsénico, plomo, mercurio, cromo y selenio cuyas concentraciones superaron los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana en agua, adicionalmente se han reportado concentraciones altas de cromo en sedimentos (Cano *et al.*, 2000, 2004; Gómez 2000).

Lo anterior es de gran importancia considerando que la contaminación de la presa tiende a emigrar hacia el sistema de pozos aledaño (Puentecillas) los cuales son utilizados como una fuente de agua potable (Cano *et al.*, 2000, 2004; Gómez, 2000).

Adicionalmente, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del estado (2005) realizó un estudio de metales (mercurio, cromo, arsénico y zinc) en peces como lobina donde concluyeron que los valores encontrados no rebasan los niveles permisibles para consumo humano.

Los estudios realizados en la presa La Purísima no han sido concluyentes y continúa sin respuesta el origen de la contaminación en la presa y la afectación sobre los organismos acuáticos (en especial peces) por lo cual es necesario un estudio que proporcione mayor información.



## **Hipótesis**

En la presa la Purísima existen contaminantes que tienen un impacto negativo en la calidad del agua y el sedimento, los cuales afectan la sobrevivencia de los peces que allí habitan.

## **III OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar y caracterizar la contaminación de la presa La Purísima mediante el análisis de agua, sedimento y su posible efecto sobre los peces que la habitan.

### **Objetivos particulares**

- a) Identificar los principales contaminantes en la presa La Purísima en agua y sedimentos.
- b) Identificar las especies de peces predominantes en la presa.
- c) Determinar biomarcadores en peces (lipoperoxidación, acetilcolinesterasa).
- d) Determinar la relación entre los biomarcadores y el estado de contaminación de la presa.
- e) Identificar metales en tejidos de peces de consumo.

## IV. METODOLOGÍA

El presente proyecto se realizó en 3 etapas. En la figura 4.1 desglosa la estrategia de trabajo seguida para la realización del presente proyecto. Asimismo en párrafos siguientes se describe la metodología que se aplicó para conseguir los objetivos anteriormente planteados.

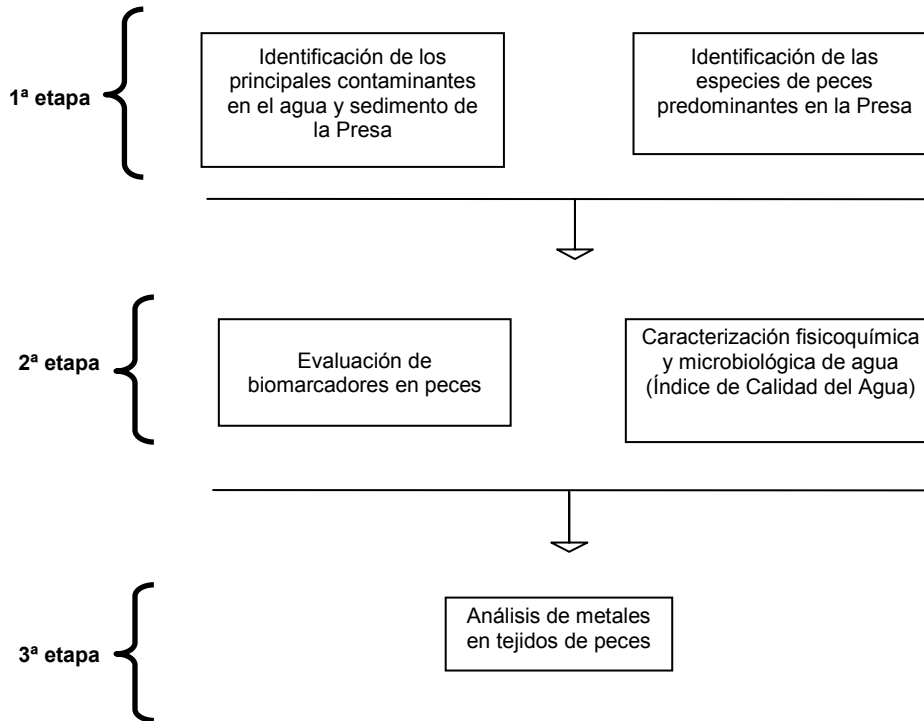


Figura 4.1. Diagrama de la estrategia de trabajo seguida para alcanzar los objetivos planteados.

## Identificación de los principales contaminantes en la presa La Purísima en agua y sedimento

El muestreo de la presa se realizó de acuerdo a la norma mexicana NMX-Z-12/1-1987 y se ubicaron 10 puntos de muestreo. Se consideraron dos muestreos, uno en época de sequía (abril) y otro en época de lluvia (octubre), lo anterior para evaluar las condiciones y comparar los diferentes parámetros en ambos periodos.

Los puntos elegidos para cada muestreo se presentan en la figura 4.2 y las coordenadas de estos puntos se encuentran en el cuadro A.1 del apéndice.

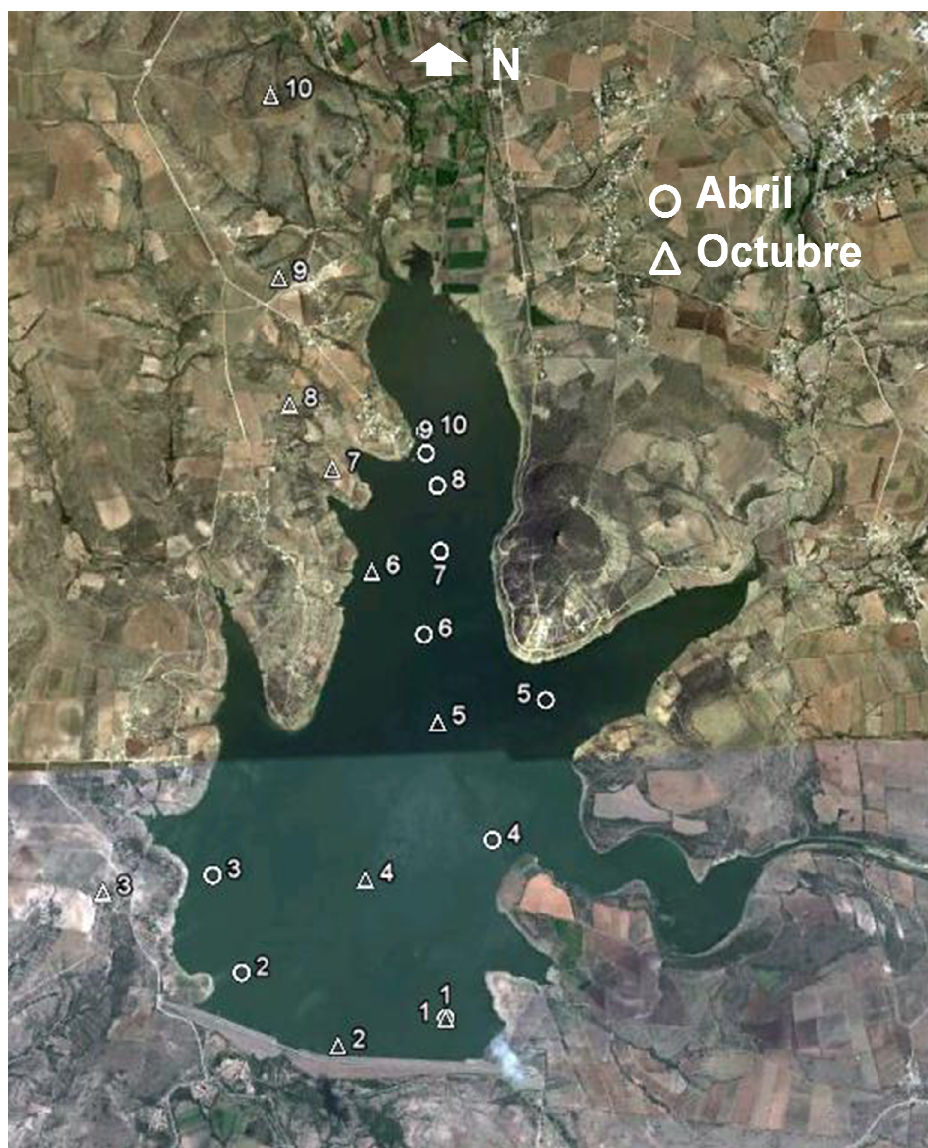


Figura 4.2. Distribución espacial de los puntos de muestreo de agua y sedimento en la presa La Purísima.

En cada punto de los observados en la figura 4.2 se muestreó agua y sedimentos a excepción de los puntos 8, 9 y 10 del muestreo del mes de abril donde solo se muestreó sedimento pues a ese nivel de la presa no se encontró agua en esa temporada del año (abril).

El muestreo de agua se llevó a cabo a 30 cm de la superficie utilizando una botella tipo Van Dor y para la obtención de sedimentos superficiales se utilizó una draga tipo Van Veen. Las muestras obtenidas fueron debidamente identificadas y preservadas a una temperatura menor a 4 °C hasta su análisis.

### **Caracterización de agua**

Para conocer el estado que guarda el agua de la presa, fue necesario obtener datos de las características físicas, químicas y microbiológicas de la misma. La medición de los parámetros en agua se realizó tanto *in situ* como en laboratorio.

Para ambos muestreos se determinaron en campo los parámetros de temperatura (NMX-AA-007-SCFI-2000), pH (NMX-AA-008-SCFI-2000) y conductividad (NMX-AA-093-SCFI-2000) y posteriormente, en laboratorio, se realizaron las determinaciones de sólidos totales (NMX-AA-034-SCFI-2001), coliformes totales y fecales (NMX-AA-42-SCFI-1987/NOM-112-SSA1-1994), fósforo soluble (INE & IMP, 2006), sulfuros totales (HACH, 2003b), carbono orgánico total e inorgánico (por combustión en un equipo Shimadzu TOC-V CSN). Adicionalmente, en el primer muestreo se determinaron sulfatos, cloruros, bromuros, nitratos y nitritos (por electroforesis capilar con detector UV-Agilent technologies) y en el segundo muestreo se realizó la determinación de sustancias activas al azul de metileno-SAAM (NMX-AA-039-SCFI-2001), demanda bioquímica de oxígeno (NMX-AA-028-SCFI-2001), alcalinidad total (NMX-AA-036-SCFI-2001), alcalinidad a la fenolftaleína (NMX-AA-036-SCFI-2001) y dureza total (NMX-AA-072-SCFI-2001),

Asimismo, debido a las diferentes actividades que se desarrollan en los alrededores de la presa, en ambos muestreos se analizaron hidrocarburos fracción

media de acuerdo al método 8015B (EPA, 1996b); hidrocarburos poliaromáticos de acuerdo al método 8310 (EPA, 1986); plaguicidas clorados: aldrín, BHC, clordano, DDD, DDE, DDT, dieldrín, endosulfán, endrín, lindano, heptacloro, heptacloro epóxido, hexaclorobenceno, metoxicloro, toxafeno mediante el método 8081A (EPA, 1996c); metales como antimonio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, hierro, litio, níquel, plata, plomo, selenio, vanadio, zinc (por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente) y mercurio (NMX AA-051-SCFI-2001/EPA, 1994). Adicionalmente, en el segundo muestreo se determinaron plaguicidas fosforados: bolstar, comafos, demeton-s, diazinon, dimetoato, EPN, etoprop, fensulfotión, fentiión, forato, malatión, merfos, metilazinfos, metilparatión, mevinfos, paration, ronnel, sulfotep, tokutiión y tricloronato de acuerdo al método 8141B (EPA, 1998a).

### **Caracterización de sedimento**

En ambos muestreos (abril y octubre), a los sedimentos se les realizaron los siguientes análisis: humedad (INE & IMP, 2006), sulfuros totales (EPA 1986b/HACH, 2003b), fósforo soluble (INE & IMP, 2006) y tamaño de partícula (EPA 1986b). Adicionalmente, a los sedimentos muestreados en abril (primer muestreo) se les realizaron mediciones de carbono total (por combustión en un equipo Shimadzu TOC-V CSN), bromuros, cloruros y sulfatos (por electroforesis capilar con detector UV- Agilent technologies).

Las muestras de sedimentos de ambos muestreos (abril y octubre) se analizaron por su contenido en hidrocarburos fracción media diesel de acuerdo al método 8015B (EPA, 1996b) y la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, hidrocarburos poliaromáticos por el método 8310 (EPA, 1986) y la NOM-138-SEMARNAT/SS-2003; plaguicidas clorados: aldrín, BHC, clordano, DDD, DDE, DDT, dieldrín, endosulfán, endrín, lindano, heptacloro, heptacloro epóxido, hexaclorobenceno, metoxicloro, toxafeno (EPA, 1996c); metales como antimonio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, fierro, litio, níquel, plata, plomo, selenio, uranio, vanadio, zinc (por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente) y mercurio (EPA ,

1994b). Adicionalmente, en el segundo muestreo se analizaron plaguicidas fosforados de acuerdo al método 8141B (EPA, 1998a).

Para el análisis de algunos parámetros en agua (sólidos totales, fósforo soluble, sulfuros totales, SAAM y metales) y sedimento (fósforo soluble, sulfuros totales, carbono total, sulfatos, bromuros, cloruros y metales) se elaboraron mapas de contorno utilizando el programa Surfer 8.0 que permiten visualizar la distribución espacial de los valores de las diferentes variables. Un mapa de contorno hace uso de curvas de nivel (isolíneas) que conectan lugares del mapa en los que una variable tiene el mismo valor y a un lado de la isolínea los valores son mayores y por el otro lado de la isolínea los valores son menores.

Para la obtención de dichos mapas se utilizaron las coordenadas obtenidas en ambos muestreos (Cuadro A. 1) y se consideró el ancho de la presa como el eje X y el largo como eje Y de acuerdo a la Figura 4.3.

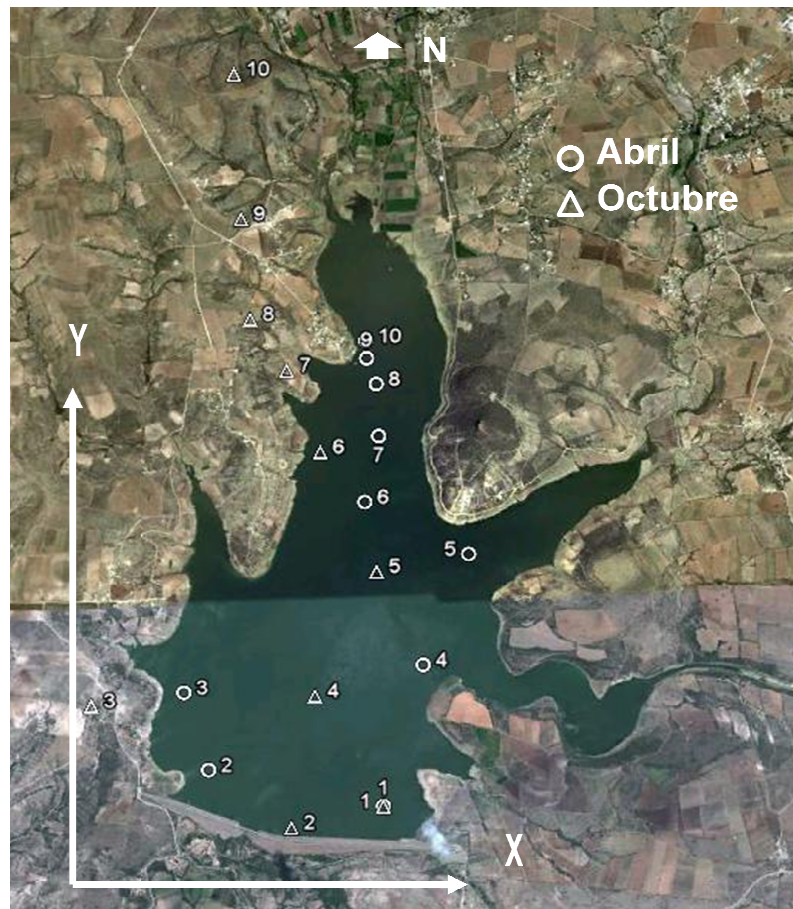


Figura 4.3. Distribución espacial de los puntos de muestreo de agua y sedimento en la presa La Purísima utilizados para la elaboración de mapas de contorno.

## **Identificación de especies de peces en la presa**

Para analizar la respuesta de biomarcadores y proporcionar información significativa, fue importante utilizar una especie de peces relevante para el ecosistema en estudio (EC, 1999) por lo cual fue necesario identificar las especies presentes en la presa. Lo anterior se realizó utilizando una red de pesca de luz de malla pequeña con lo que se logró coleccionar peces de diversos tamaños en distintas zonas de la presa hasta reunir cinco ejemplares de cada pez de forma diferente que se logró distinguir. Posteriormente los peces elegidos se conservaron en formol en una fracción de volumen del 10 % hasta su disección para su inspección visual para ser comparados con las claves taxonómicas de acuerdo a diferentes características como son la forma del cuerpo, tamaño, patrón de coloración, número de radios en las aletas, número de escamas, entre otros (Álvarez, 1970).

## **Evaluación de biomarcadores en peces**

### **Aclimatación de peces en acuario**

Una vez identificados los peces de la presa, se procedió a realizar una colecta de los peces de las especies *Goodea atripinnis* y *Xenotoca variata* para evaluar su aclimatación en peceras con la finalidad de ser utilizados posteriormente en la medición de biomarcadores. Lo anterior se realizó de acuerdo a los métodos de referencia canadienses (EC, 2000). Los peces se aclimataron en peceras de vidrio con una capacidad de 40 L utilizando agua de la presa La Purísima en que estaban contenidos y posteriormente esta agua se intercambiaba paulatinamente por agua potable previamente aireada. Las peceras se mantuvieron limpias sifoneando diariamente los desechos producidos por los peces. La alimentación de los peces se realizó una vez al día utilizando hojuelas comerciales, el periodo de luz fue natural y se suministró oxígeno a través de una bomba de aireación.



El procedimiento anterior (EC, 2000) fue repetido para la aclimatación de peces de la especie *Goodea* procedentes de un estanque de Texcoco proporcionados por el laboratorio de Ictiología y Limnología de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.

### **Evaluación de lipoperoxidación y acetilcolinesterasa en peces**

Para evaluar el efecto de los contaminantes presentes en la presa sobre los peces, se realizó un análisis de biomarcadores en diferentes tejidos. Se eligieron tres sitios a lo largo de la presa para el muestreo de agua considerando un punto de muestreo cercano a la entrada del río, en la parte media de la presa y cerca de la cortina de acuerdo a lo observado en la figura 4.4.



Figura 4.4. Distribución de los tres puntos de muestreo de agua para la evaluación de biomarcadores en peces en la presa La Purísima.



Los peces provenientes de Texcoco (*G. atripinnis*), previamente aclimatados, fueron expuestos al agua de la presa La Purísima de cada sitio de muestreo. Para lo anterior se utilizó una pecera con un volumen de muestra de 30 L por cada sitio (con su respectiva réplica) en la cual fueron introducidos trece ejemplares de peces. Además, se utilizó una pecera como control que contenía el agua en que los peces fueron aclimatados.

Las peceras se mantuvieron limpias sifoneando diariamente los desechos producidos por los peces. La alimentación de los peces se realizó una vez al día utilizando hojuelas comerciales, el periodo de luz fue natural y se suministró oxígeno a través de una bomba de aireación.

Después de 96 horas de exposición, los peces fueron sacrificados y diseccionados para obtener hígado, branquias y músculo. Estos tres órganos fueron analizados para determinar el nivel de lipoperoxidación mediante el método espectrofotométrico de Buege & Aust (1978) que está basado en una reacción con ácido tiobarbitúrico que forma un compuesto colorido (malondialdehído) cuya absorción máxima se encuentra a una longitud de onda de 532 nm. Así mismo, en branquias y músculo se determinó la actividad de la acetilcolinesterasa mediante el método de Hestrin (1949) el cual se basa en la lectura espectrofotométrica de un compuesto férrico de ácido acetidroxámico colorido formado por la reacción entre la acetilcolina y la hidroxilamina a un pH básico.

### **Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua (ICA)**

Para agrupar los parámetros indicadores del deterioro de la calidad del agua y relacionarlo con los niveles de actividad de la acetilcolinesterasa y la lipoperoxidación en peces, se obtuvo un índice de calidad del agua (ICA) de acuerdo a Dinius (1987). Para lo anterior, se analizaron los siguientes parámetros en las muestras de agua provenientes de los tres puntos de muestreo (figura 4.4): pH (NMX-AA-008-SCFI-2000), temperatura del agua y del aire (NMX-AA-007-SCFI-2000), conductividad (NMX-AA-093-SCFI-2000), oxígeno disuelto (NMX-AA-012-SCFI-2001), demanda bioquímica de oxígeno, DBO (NMX-AA-028-SCFI-

2001), alcalinidad (NMX-AA-036-SCFI-2001), dureza (NMX-AA-072-SCFI-2001), coliformes totales y fecales (NMX-AA-42-SCFI-1987), color (HACH, 2003a), nitratos (NMX-AA-079-SCFI-2001) y cloruros (NMX-AA-073-SCFI-2001). Adicionalmente, se analizó el contenido de metales en agua de los tres puntos de muestreo: antimonio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, hierro, litio, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, vanadio y zinc mediante la técnica de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.

### **Análisis de metales en tejidos de peces**

Como una evaluación del grado de afectación de los peces presentes en la presa, se seleccionaron peces para consumo humano y se obtuvieron seis ejemplares por cada punto de muestreo. Los puntos de muestreo estuvieron en función de los lugares donde comúnmente se realiza la pesca por habitantes de la zona. En la figura 4.5 se observan los puntos de muestreo de los peces cuyos tejidos fueron analizados. Los puntos 5 y 6 son los más cercanos a la entrada del río Guanajuato, los puntos 1 y 2 se encuentran en la parte media de la presa y los puntos 3 y 4 fueron puntos intermedios.



Figura 4.5. Distribución espacial de los puntos de muestreo de peces en la presa La Purísima.

Una vez capturados los peces, se conservaron a una temperatura menor de 4 °C para ser transportados al laboratorio donde fueron diseccionados para obtener diferentes tejidos (músculo, hueso, hígado, branquias y vísceras). Los tejidos obtenidos fueron secados y sometidos a una digestión ácida en un sistema de digestión abierto de acuerdo al método EPA 3050B (1996) y analizados mediante la técnica de espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente.

## V RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Identificación de los principales contaminantes en la presa La Purísima en agua y sedimento

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la caracterización del agua y sedimento de la presa La Purísima de acuerdo a los puntos muestreados (figura 4.2).

#### Caracterización de agua

El intervalo de temperaturas encontradas en ambos muestreos en el agua de la presa fue de 22 a 25°C (Cuadro 5.1), siendo el punto 1 el de máxima temperatura. Estos valores se encontraron por debajo de los 40°C permitidos por las normas mexicanas para descargas de agua para la protección de la vida acuática (NOM-001-SEMARNAT-1996).

Contrario a lo esperado para sistemas naturales, el pH en las muestras de agua de la presa es ligeramente alcalino (Cuadro 5.1) lo cual sugiere la presencia de carbonatos y bicarbonatos, especialmente durante el primer muestreo (abril) cuyo máximo alcanzó valores de 9.2. Durante el segundo muestreo (octubre) el pH fue menor con un valor máximo de 8.5. Este comportamiento es comprensible considerando que el segundo muestreo se realizó en la época de lluvia, la cual es ligeramente ácida y pudo neutralizar los valores de pH. Como se mencionó anteriormente, los valores de pH del primer muestreo superan las 8.5 unidades marcadas como lineamiento de calidad del agua para la protección de la vida acuática en agua dulce que marca la Ley Federal de Derechos (DOF, 2007). También superan valores encontrados en corrientes como el río Nexapa en Puebla o lagunas de agua residuales como la de Zumpango en el Estado de México cuyos valores de pH máximos son de 8.5 (Flores & Gabino, 2004; Franco *et al.*, 2006). También es superior a valores de pH encontrados en embalses artificiales como el bordo Lagarto y Cuauhtémoc en Puebla cuyos valores de pH

máximo son de 7.6 y pH 7.8 respectivamente (Villegas *et al.*, 2006). Por el contrario, los valores de pH en La Purísima igualan los máximos (9.2) encontrados en la presa Valle de Bravo en el Estado de México (Robles *et al.*, 2004) y son superados por los encontrados en el lago de Xochimilco que alcanzan valores máximos de 9.8 (Robles *et al.*, 2004b).

La conductividad eléctrica (Cuadro 5.1) fue mayor en abril en comparación con octubre (a excepción del punto 10) con valores en el intervalo de 520 – 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esto se explica debido a que las sales presentes en los sedimentos se disocian en el agua, que en esta época del año es menor. En contraste, el valor máximo de conductividad fue encontrado durante el segundo muestreo en el punto 10 (1190  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en la entrada del río donde la profundidad del sitio era muy baja (alrededor de 1 m) y el agua presentaba poco movimiento por lo cual estuvo más tiempo en contacto con los sedimentos ocasionando posiblemente una mayor disociación de las sales lo cual está correlacionado con las altas concentraciones de sólidos totales presentes en este punto. Por otra parte, los valores de conductividad en ambos muestreos superan los valores encontrados en bordo Lagarto y Cuauhtémoc cuyos valores máximos son de 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 231  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente (Villegas *et al.*, 2006) y los valores del primer muestreo superan los valores máximos (434  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) encontrados en el río Nexapa (Franco *et al.*, 2006) pero fueron menores a los encontrados en cuerpos contaminados como la laguna de Zumpango con valores máximos de 607  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Flores & Gabino 2004) y el río Amecameca, en el valle del Estado de México donde se han registraron valores hasta de 661600  $\mu\text{S} /\text{cm}$  (Martínez, 1997).

Los sólidos totales en las muestras de agua fueron mayores durante abril (Cuadro 5.1), a excepción del punto 10 en octubre, donde se encontró el valor máximo (823.7 mg/L). Los valores en ambos muestreos superan los valores promedio (107.1 mg/L) encontrados en la presa Valle de Bravo (Robles *et al.*, 2004) y el punto 10 supera también el valor máximo de 480 mg/L reportado en la laguna de Zumpango (Flores & Gabino, 2004) indicando la posible presencia de contaminantes o partículas que pueden afectar la transmisión de luz a través de la columna de agua.

**Cuadro 5.1 Resultados de los parámetros en muestras de agua de la presa La Purísima**

Parámetros	Meses	Puntos de muestreo									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T (°C)	abril	25	22	22	23	22	22	23	NR	NR	NR
	octubre	23	22	22	22	22	22	22	22	23	23
pH	abril	9.2	9.1	9.0	9.2	9.2	9.1	9.2	NR	NR	NR
	octubre	8.5	8.4	8.1	7.8	7.5	7.6	7.7	7.7	7.7	7.6
Conductividad eléctrica (uS/cm)	abril	540	550	540	520	530	530	520	NR	NR	NR
	octubre	340	340	350	350	350	350	340	360	360	1190
Sólidos totales (mg/L)	abril	344.6	372.1	366.9	354.6	339.8	356.5	425.6	NR	NR	NR
	octubre	248.7	264.0	225.7	232.0	229.7	233.7	234.7	229.7	260.7	823.7
Coliformes totales (NMP/100 mL)	abril	<3	4	23	9	7	9	23	NR	NR	NR
	octubre	9	23	23	43	≥2400	1100	1100	≥2400	1100	1100
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	abril	<3	<3	4	<3	4	4	<3	NR	NR	NR
	octubre	<3	9	21	<3	7	240	460	1100	15	<3

NR: No realizado

En la Figura 5.1 se observa que los valores mayores de sólidos totales fueron encontrados en la parte norte de la presa, especialmente en la entrada del río Guanajuato durante el segundo muestreo y se observa que el contenido de sólidos totales se extiende hacia el centro de la presa en el primer muestreo, lo cual puede explicarse considerando que estos son los puntos donde la profundidad es menor y por lo tanto existe un mayor intercambio de material entre la columna de agua y el sedimento adyacente.

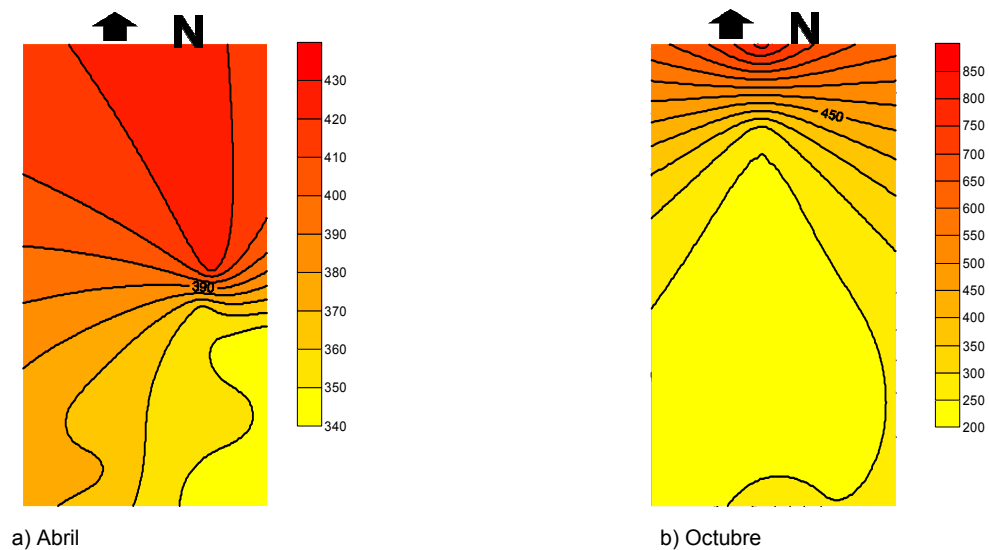


Figura 5.1. Mapa de contorno de la concentración de sólidos totales en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En general, la cuenta de coliformes totales y fecales (Cuadro 5.1) fue mayor durante el segundo muestreo (octubre) que durante el primero (abril) especialmente en los puntos cercanos a la entrada del río (puntos 5-10), esto probablemente debido al arrastre de aguas contaminadas a través del río durante la época de lluvias. La cuenta de coliformes totales durante el segundo muestreo alcanzó valores de 2 400 NMP/100 mL (puntos 5 y 8), lo cual es de especial interés considerando que la presa se encuentra en comunicación con pozos que surten de agua potable a las comunidades aledañas (Gómez, 2000). Estos valores son menores que los encontrados en el río Zanatenco en Chiapas y en la laguna de Zumpango en el Estado de México donde los valores de coliformes totales son mayores a 24 000 NMP/100 mL (Graniel & Carrillo, 2006; Flores & Gabino 2004).

Por otra parte, la cuenta de coliformes fecales encontrados en abril fue baja, pero los valores en octubre excedieron, en tres puntos de muestreo (6, 7 y 8) los criterios ecológicos de calidad de agua para la protección de la vida acuática que marca como nivel máximo 200 NMP/100 mL (DOF, 1989). Finalmente, los valores de coliformes fecales encontrados en la presa son menores a los reportados por Graniel & Carrillo (2006) en el río Zanatenco (mayores a 24 000 NMP/100 mL) y en la laguna de Zumpango (Flores & Gabino, 2004) cuyos valores superan 1 100 000 NMP/100 mL.

Las concentraciones de fósforo soluble en el primer muestreo fueron altas, alcanzando un valor máximo de 3.6 mg/L en el punto 3 (Figura 5.2) y durante el segundo muestreo fueron menores, probablemente debido a un efecto de dilución causado por el agua pluvial. A excepción de los puntos donde el fósforo soluble no fue detectado en el segundo muestreo (puntos 1, 4, 5 y 6), los resultados permiten sugerir que el fósforo total (no determinado en este estudio) se encuentra por encima de los 0.05 mg/L que es el valor máximo permisible por el lineamiento de calidad para la protección de la vida acuática indicado por la Ley Federal de Derechos (DOF, 2007). Lo anterior es de gran importancia considerando que el exceso de este nutriente ocasiona condiciones eutróficas en la presa.

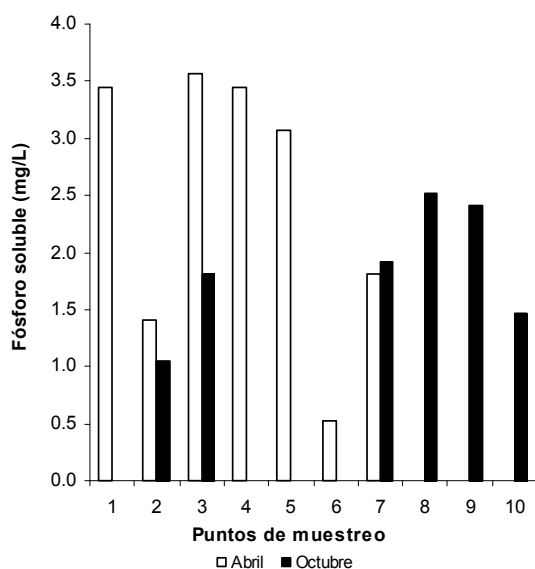


Figura 5.2 Concentración de fósforo soluble en muestras de agua de la presa La Purísima.



La distribución espacial del fósforo soluble cambió de un muestreo a otro. En abril, las concentraciones mayores se encontraron en la parte sur de la presa y en octubre se encontraron en la parte noroeste de la presa, en la entrada del río (Figura 5.3), cercanas a la población lo cual sugieren un origen antropogénico, posiblemente por la presencia de fertilizantes ya que una correlación negativa (-0.502) con las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) durante el segundo muestreo sugieren que el fósforo soluble no está relacionado con la presencia de detergentes.

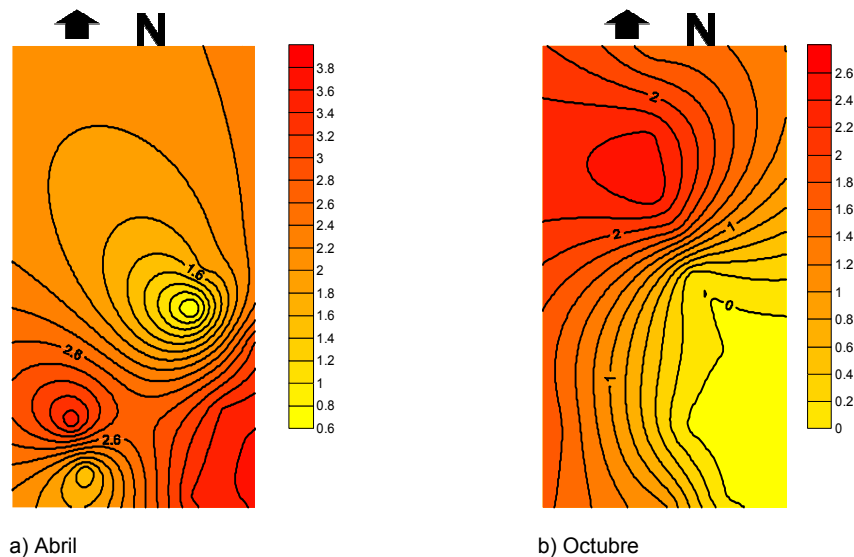


Figura 5.3 Mapa de contorno de la concentración de fósforo soluble en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En cuanto al contenido de sulfuros totales, los resultados no mostraron una diferencia importante entre los dos muestreos (Figura 5.4), los valores encontrados fueron de 0.083 a 0.171 mg/L en el primer muestreo y de no detectables (puntos 1, 4 y 8) a 0.339 mg/L durante el segundo muestreo, encontrando el valor máximo durante el segundo muestreo en el punto 6. A excepción de los puntos donde el sulfuro no fue detectado, todos los puntos superaron el valor límite permisible para la protección de la vida acuática (DOF, 1989) que marca como concentración máxima 0.002 mg/L.

El contenido de sulfuros en cuerpos de agua es importante debido a que puede alterar la movilidad de los metales al formar sulfuros metálicos de baja solubilidad y es indicativo de un bajo nivel de oxígeno disuelto que puede provocar una degradación anaeróbica de la materia orgánica y ocasionar la presencia de olores desagradables.

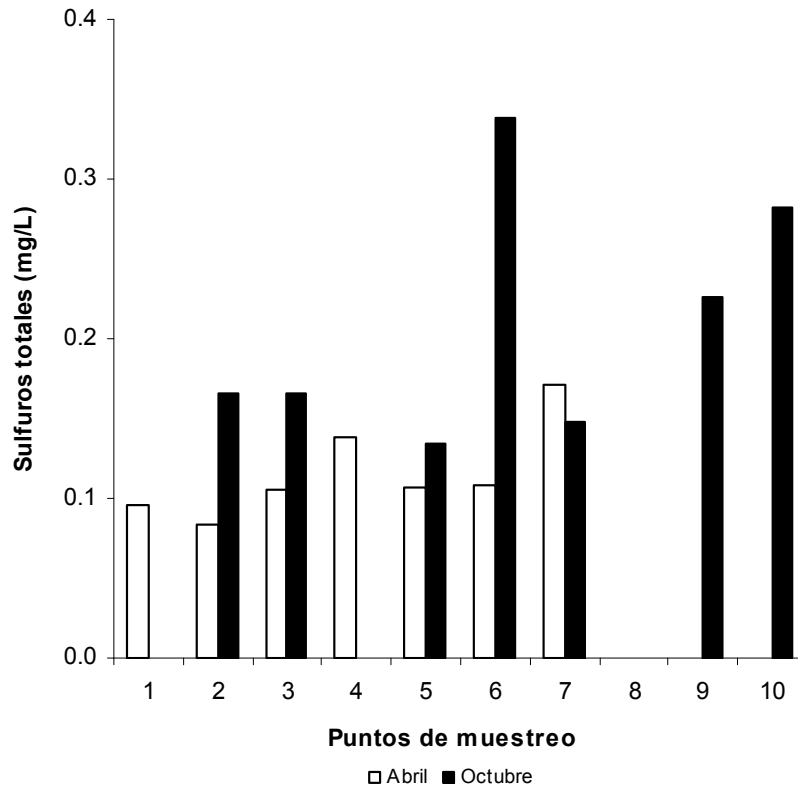


Figura 5.4 Concentración de sulfuros totales en muestras de agua de la presa La Purísima.

En la presa, los puntos de muestreo cercanos a la entrada del río presentaron las mayores concentraciones de sulfuros totales en ambos muestreos (Figura 5.5) lo cual indica que son las áreas de la presa con una menor concentración de oxígeno disuelto ya que la columna de agua no es capaz de oxidar dichos sulfuros. Esto podría ser el resultado de un mayor movimiento de agua en la parte sur de la presa (cercana a la compuerta) con el respectivo aumento en el intercambio de oxígeno entre la atmósfera y el agua.

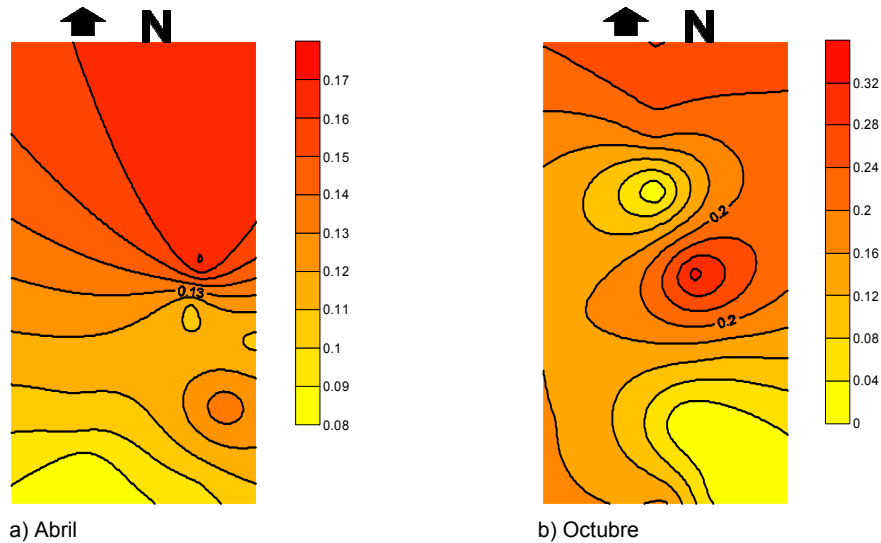


Figura 5.5 Mapa de contorno de la concentración de sulfuros totales en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En el caso de la concentración de carbono total en agua, este parámetro no presentó variaciones importantes durante los dos muestreos. Solo el punto 10 (32.2 mg/L) presentó un valor alto para el carbono total durante el segundo muestreo (Figura 5.6). Para ambos muestreos, el contenido de carbono se encontró principalmente en forma de carbono orgánico en un intervalo de concentración de 7.2 a 12.6 mg/L los cuales se encuentran dentro de los valores comunes para sistemas naturales. Este parámetro es importante debido a que su presencia puede ocasionar el secuestro de contaminantes orgánicos presentes en la presa. Por otra parte, el carbono inorgánico se encontró en un intervalo de 2.8 a 19.6 mg/L, siendo el punto 10 (del segundo muestreo-octubre) el que presentó la máxima concentración de carbono inorgánico.

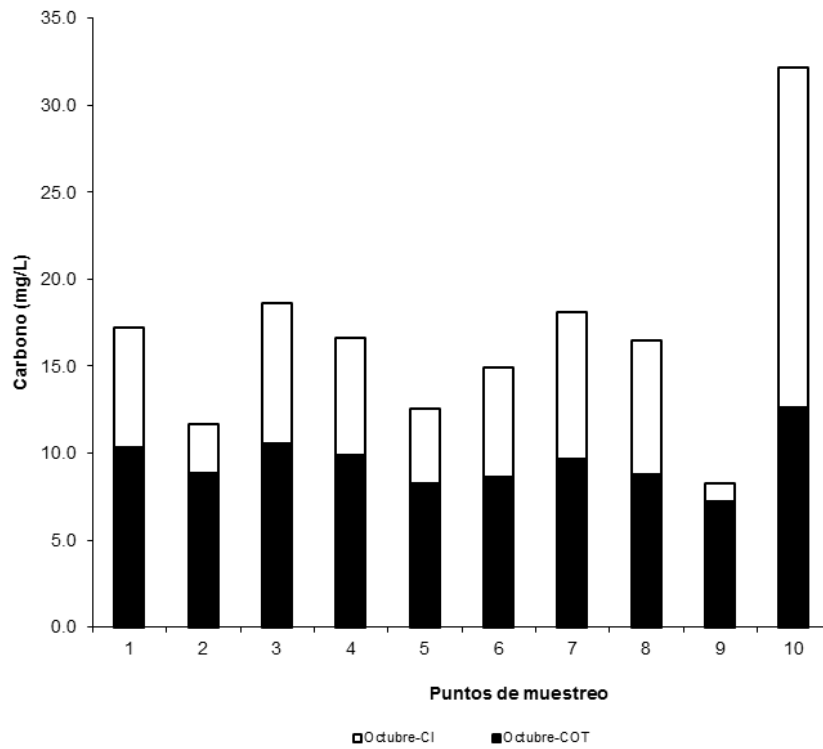
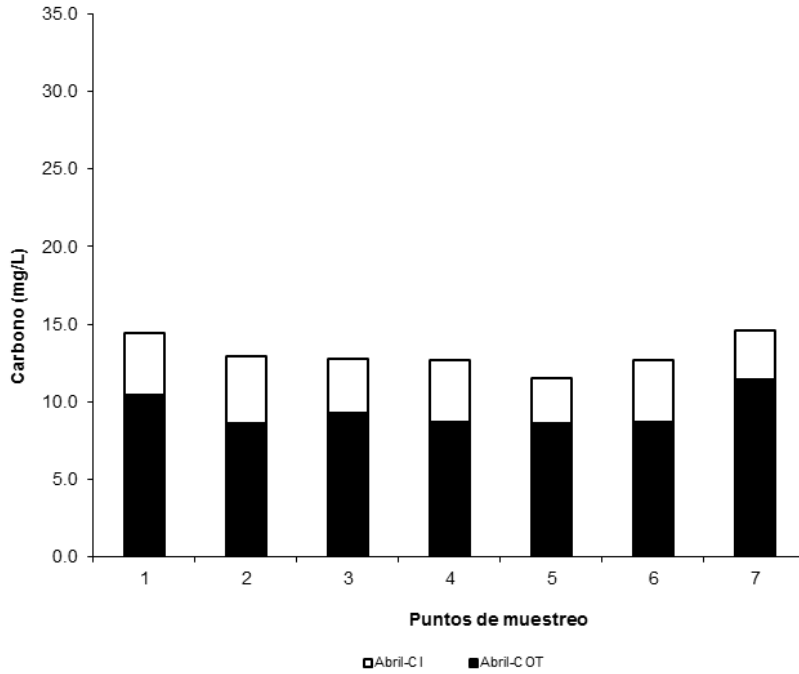


Figura 5.6 Concentración de carbono en muestras de agua de la presa La Purísima.

Por otra parte, el análisis de bromuros, nitratos y nitritos solo fue realizado durante el primer muestreo, encontrándose éstos por debajo de los límites de detección. La ausencia de nitratos y nitritos es indicativa de la carencia de una fuente externa de ellos ya que concentraciones de nitratos por arriba de 1 mg/L revelarían aportes de origen antropogénico y concentraciones de nitritos superiores a 0.05 mg/L indicarían condiciones anóxicas o aportes de aguas residuales con contenidos de nitrógeno amoniacal (SSRH, 2003). Los valores de nitritos y nitratos encontrados en la presa se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles (10 mg/L para nitratos y 0.05 mg/L para nitritos) marcados por la normatividad mexicana para uso y consumo humano de agua (NOM-127-SSA1-1994).

La concentración de cloruros determinada en las muestras de agua de la presa también fue baja (Figura 5.7), la cual osciló entre 15.5 y 22.2 mg/L siendo el punto 6 el que presentó una mayor concentración. Estas concentraciones son menores al límite máximo de 250 mg/L establecido como criterio ecológico de calidad de agua para la protección de la vida acuática de agua dulce (DOF, 1989) y para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994).

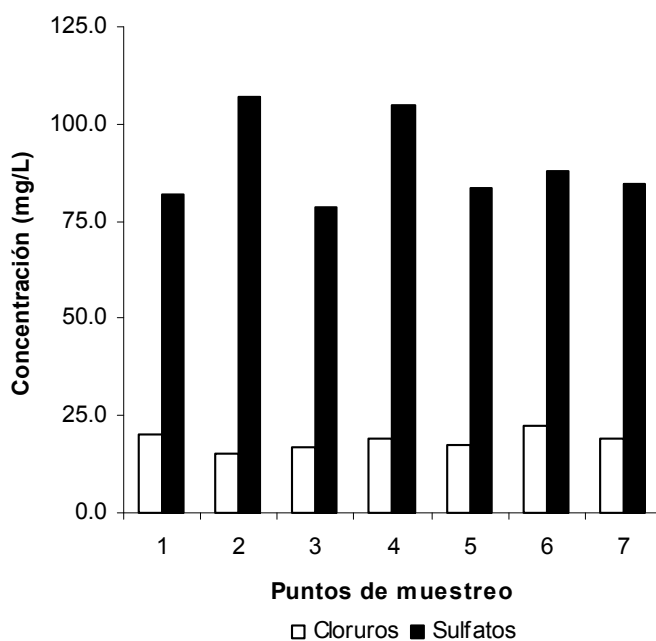


Figura 5.7 Concentración de cloruros y sulfatos en muestras de agua de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril).

En cuanto a las concentraciones de sulfatos, durante el primer muestreo (Figura 5.7), el intervalo de concentraciones encontrado fue de 78.7 a 107.0 mg/L, encontrando que el punto 2 presentó la máxima concentración. Todos los valores determinados se encontraron por arriba de los 0.005 mg/L marcados como límite máximo para la protección de la vida acuática (DOF, 1989) y por arriba también de los valores reportados para la laguna de Zumpango (Flores & Gabino, 2004) cuyo valor máximo es de 29.4 mg/L. Sin embargo, los valores de sulfatos se encuentran por debajo de los 400 mg/L marcados como límite máximo para uso y consumo humano de agua (NOM-127-SSA1-1994).

Durante el segundo muestreo, los niveles de DBO se encontraron en un intervalo de 0.5 a 7.6 mg/L (Cuadro 5.2), estas concentraciones son bajas comparadas con los valores de DBO (30 mg/L) establecidos como lineamiento para la protección de la vida acuática (Ley Federal de Derechos, 2006; NOM-001-SEMARNAT-1996), también son concentraciones bajas en comparación con la determinada en sitios como la laguna de Zumpango (228 mg/L de DBO) (Flores & Gabino, 2004) o en el río Amecameca cuyas concentraciones de DBO alcanzan valores de 260 mg/L (Martínez, 1997). Por otra parte, los niveles de DBO en La Purísima superan los niveles máximos encontrados en embalses artificiales como la presa Valle de Bravo (3.41 mg/L), el bordo Lagarto (1.5 mg/L) y el bordo Cuauhtémoc (1.2 mg/L) (Robles *et al.*, 2004; Villegas *et al.*, 2006). Estos valores indican que la contaminación por materia orgánica en la presa La Purísima es mínima.

Cuadro 5.2 Resultados de DBO y SAAM en muestras de agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo.

Parámetros	Puntos de muestreo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DBO (mg/L)	7.57	4.23	NR	5.40	NR	2.90	2.63	1.20	0.53	NR
SAAM (mg/L)	0.08	0.07	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.01	0.24

NR: No realizado

Las concentraciones de las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en la presa La Purísima fueron bajas respecto al criterio ecológico para la protección de la vida acuática (DOF, 1989) cuyo límite superior es 0.1 mg/L a excepción del punto 10 (Cuadro 5.2) que presentó una concentración de 0.24 mg/L. Sin embargo, los valores encontrados en La Purísima son menores a los hallados en otras corrientes contaminadas como la laguna de Zumpango con un valor máximo de 0.35 mg/L (Flores & Gabino, 2004), el río Zanatenco cuyas concentraciones alcanzan los 1.4 mg/L (Graniel & Carrillo, 2006) y el lago de Xochimilco con valores de hasta 77.44 mg/L (Robles *et al.*, 2004b). Valores altos de SAAM serían indicativos de la presencia de compuestos fosforados que bajo ciertas condiciones pueden conducir a la eutrofización de un cuerpo de agua.

En la Figura 5.8 se aprecia que las concentraciones más altas de SAAM fueron encontradas en la entrada del río y en la parte oeste de la presa (donde se encuentra la población) lo cual es indicativo de un origen antropogénico, posiblemente generado por los detergentes utilizados en las actividades de la población.

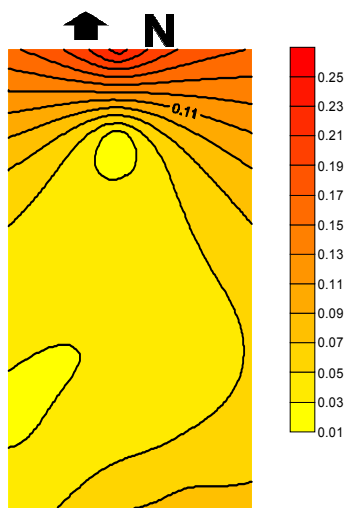


Figura 5.8 Mapa de contorno de la concentración de SAAM en las muestras de agua de la presa La Purísima en octubre

En cuanto a los parámetros de alcalinidad y dureza (Figura 5.9), los valores fueron similares en los diferentes puntos de la presa, a excepción del

punto 10 (más cercano a la entrada del río) donde los valores fueron mayores: 273.6 mg/L de alcalinidad y 345.6 mg/L de dureza. Así mismo, en la Figura 5.9 se observa que los valores bajos de alcalinidad a la fenolftaleína y su relación con la alcalinidad total son indicativos de la ausencia de hidróxidos a lo largo de la presa. Además, la presencia de la alcalinidad a la fenolftaleína en los tres primeros puntos de la presa (cerca de la cortina) proporciona evidencia de la presencia de carbonatos en dichos puntos, aunque sus concentraciones sean menores al 25% de la alcalinidad total ya que esta se encuentra formada principalmente por bicarbonatos. También puede observarse que en todos los puntos por lo menos el 70% de la dureza total se atribuye a carbonatos.

Los niveles de alcalinidad total en la presa superaron los reportados en estudios realizados en el río Nexapa en Puebla con valores máximos de 260 mg/L (Franco *et al.*, 2006), bordo Lagarto y Cuauhtémoc con valores máximos de 74 mg/L y 67 mg/L respectivamente (Villegas, *et al.*, 2006) y la presa Valle de bravo con un valor promedio de 74.4 mg/L (Robles *et al.*, 2004). Los valores de la presa solo son superados por los valores máximos (302.9 mg/L) encontrados en la laguna de Zumpango (Flores & Gabino, 2004).

Por otra parte, los valores de dureza total en la presa, se encuentran por debajo de los 500 mg/L que marca la normatividad como límite máximo permisible para agua de uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994) pero todos los puntos muestreados superan los valores encontrados en otros estudios como la presa Valle de bravo con valores de dureza de hasta 67.5 mg/L (Robles *et al.*, 2004) y los del bordo Lagarto y Cuauhtémoc con valores máximos de 51 mg/L y 79 mg/L respectivamente (Villegas *et al.*, 2006). Asimismo, el punto 10 supera los valores máximos encontrados en el río Nexapa (294 mg/L) (Franco *et al.*, 2006) y la laguna de Zumpango (167.8 mg/L) (Flores & Gabino, 2004).



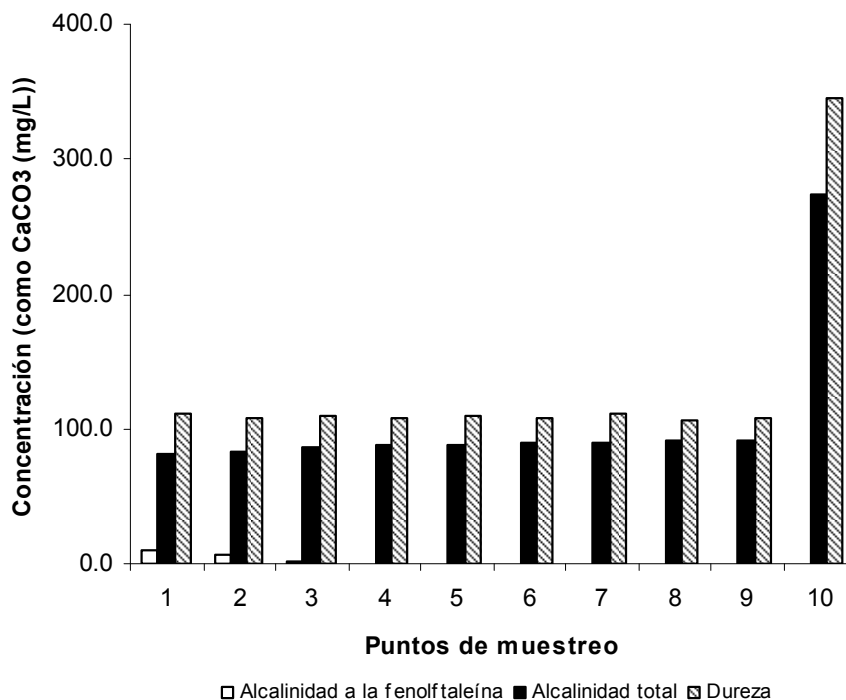


Figura 5.9. Alkalinidad a la fenolftaleína, alcalinidad total y dureza en agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre).

Por otro lado, los hidrocarburos fracción diesel y los plaguicidas organoclorados analizados en ambos muestreos así como los plaguicidas organofosforados analizados durante el segundo muestreo, no fueron detectados en las muestras de agua. Únicamente en el punto 2 durante el segundo muestreo se encontró naftaleno en una concentración muy baja de 0.1  $\mu\text{g/L}$ , que es menor a los 10  $\mu\text{g/L}$  marcados como criterio para la protección de la vida acuática de efectos crónicos que establece el estado de Nueva York (DoW, 1998). En el resto de los puntos no fueron encontrados otros hidrocarburos poliaromáticos.

### Metales en agua

En el cuadro 5.3 se presentan los estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales encontradas en agua durante los dos muestreos, así como los valores máximos permitidos por la normatividad mexicana, los criterios ecológicos de calidad de agua (DOF, 1989) y los valores criterio para agua en el

estado de Nueva York (DoW, 1998). Se distingue un intervalo amplio de valores para las concentraciones de mercurio, plomo y zinc principalmente, cuyos coeficientes de variación son mayores a 1 (Cuadro 5.3) lo que podría indicar una fuente diferente al resto de los metales cuyo coeficiente de variación es menor a 1 (Yongming *et al.*, 2006). Las concentraciones de plata, arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, antimonio y zinc encontradas en la presa La Purísima son bajas y no se acercan a los límites máximos permisibles por la normatividad. Por el contrario, la concentración máxima de hierro (1 046.63 µg/L) encontrada durante el primer muestreo (abril) en el punto 7 sobrepasa el criterio ecológico de la calidad del agua para la protección de la vida acuática dulce (DOF, 1989). Por otra parte, solo en dos puntos de la presa se encontró mercurio pero ambos valores sobrepasan los 0.01 µg/L marcados como criterio ecológico de la calidad del agua para la protección de la vida acuática dulce (DOF, 1989). Así mismo, la concentración máxima de selenio encontrada en el punto 10 durante el segundo muestreo (octubre) sobrepasa la concentración máxima de 8 µg/L (como selenato) considerados en los criterios de la calidad del agua para la protección de la vida acuática dulce (DOF, 1989); también se observa que la concentración máxima de vanadio (12.95 µg/L) se acerca a los criterios límite para la protección de la vida de efectos crónicos, propuesta en el estado de Nueva York (DoW, 1998).

Cuadro 5.3 Concentraciones de metales en agua de la presa La Purísima (µg/L)

Elemento	Concentración máxima		Concentración mínima		Promedio de todos los puntos				Desviación estándar		Valor límite		Normatividad
	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre			
	0.50	0.02	0.18	0.01	0.26	0.01	0.12	0.01	0.01	0.01	50 <sup>1</sup>	200	
Ag	0.50	0.02	0.18	0.01	0.26	0.01	0.12	0.01	0.01	0.01	50 <sup>1</sup>	200	DoW, 1998
As	11.23	17.43	9.39	9.67	10.15	10.67	0.59	2.38	2.38	2.38	200	200	DOF, 1989
Cd	0.20	0.07	0.12	0.02	0.15	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	200	200	NOM 001-SEMARNAT-1996
Cr	2.73	0.98	0.99	0.25	1.81	0.46	0.55	0.24	0.24	0.24	1 000	1 000	NOM 001-SEMARNAT-1996
Cu	5.95	3.57	1.03	1.61	3.04	2.41	1.86	0.58	0.58	0.58	6 000	6 000	NOM 001-SEMARNAT-1996
Fe	1046.63	501.50	218.21	114.40	343.38	174.82	310.19	118.71	118.71	118.71	1 000	1 000	DOF, 1989
Hg	5.00	ND	ND	ND	1.00	ND	1.91	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	DOF, 1989
Li	6.18	27.55	5.66	7.36	5.87	9.62	0.16	6.30	6.30	6.30	NA	NA	NA
Ni	2.52	4.24	1.41	1.68	1.82	2.07	0.38	0.78	0.78	0.78	4 000	4 000	NOM 001-SEMARNAT-1996
Pb	7.48	1.57	0.63	0.26	1.91	0.63	2.48	0.43	0.43	0.43	400	400	NOM 001-SEMARNAT-1996
Sb	1.28	1.07	0.93	0.69	1.01	0.74	0.13	0.12	0.12	0.12	90	90	DOF, 1989
Se	1.44	10.60	1.22	3.07	1.35	3.90	0.07	2.35	2.35	2.35	8	8	DOF, 1989
V	7.12	12.95	3.11	5.80	3.83	6.74	1.45	2.19	2.19	2.19	14 <sup>2</sup>	14 <sup>2</sup>	DoW, 1998
Zn	101.96	531.65	8.14	52.17	27.91	239.18	34.73	160.62	160.62	160.62	20000	20000	NOM 001-SEMARNAT-1996

ND: No detectado, NA: No aplica, <sup>1</sup>valores criterio para la protección de fuentes de agua potable, <sup>2</sup>valores criterio para la protección de la vida acuática de efectos crónicos

En la Figura 5.10 se observan los gradientes de concentración de plata en abril y octubre. Se aprecian las concentraciones mayores en la parte norte de la presa (en la entrada del río) en ambos muestreos y disminuyen conforme se avanza hacia la cortina (parte sur). Las concentraciones de plata son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de 0.50  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 0.02  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3).

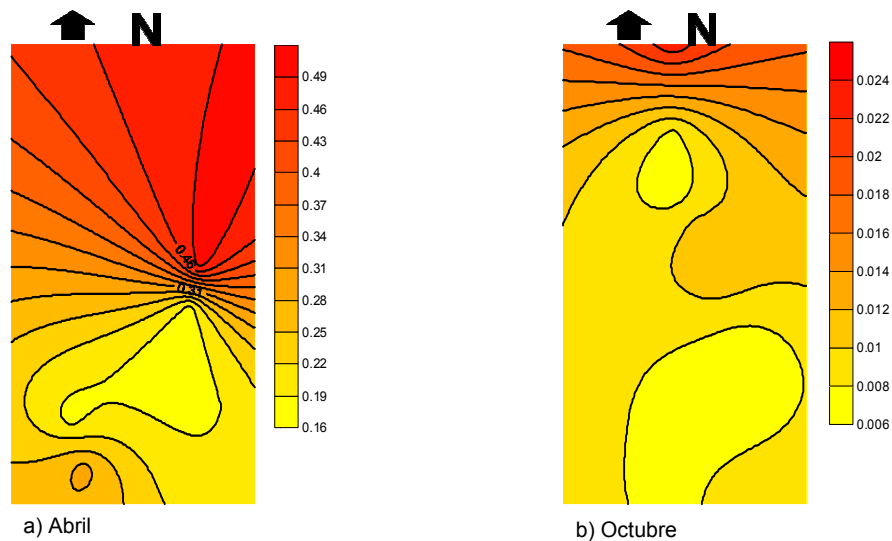


Figura 5.10 Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.11 se observan los gradientes de concentración de arsénico en abril y octubre. Las concentraciones mayores se observan en la parte norte de la presa y disminuyen conforme se acerca hacia la cortina. Las concentraciones de arsénico son similares en la temporada de sequía (abril) y lluvias (octubre), aunque la concentración máxima en abril fue de 11.23  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 17.43  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Ambas concentraciones de arsénico superan los niveles del río Zanatenco, en el estado de Chiapas, donde las concentraciones máximas fueron de 10  $\mu\text{g/L}$  (Graniel & Carrillo, 2006).

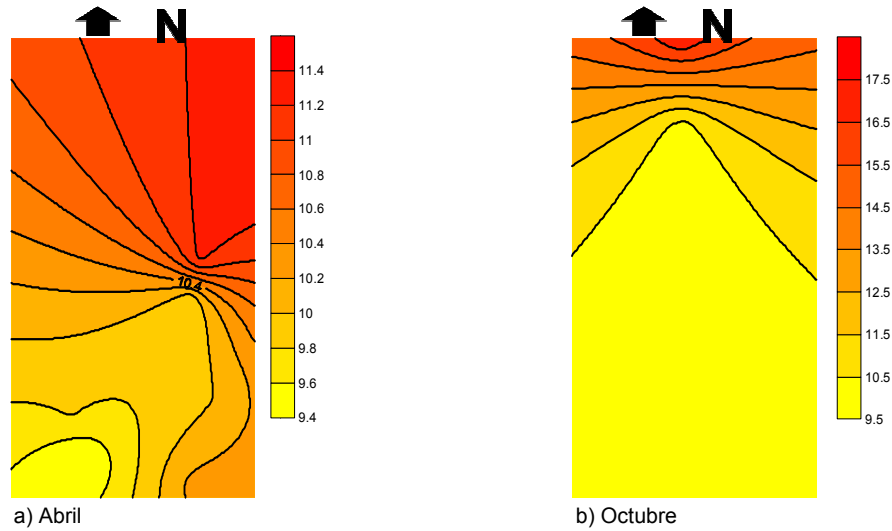


Figura 5.11 Mapa de contorno de la concentración de arsénico en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

El gradiente de cadmio fue diferente en los muestreos (Figura 5.12). En abril, las concentraciones fueron mayores en la parte este de la presa y en octubre se encontraron en la parte suroeste y sureste (cerca de la cortina). Las concentraciones de cadmio son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de  $0.20 \mu\text{g/L}$  y en octubre de  $0.07 \mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Estos valores son menores a los encontrados en agua marina de la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima reportada fue de  $0.32 \mu\text{g/L}$ ; la presa Sandile en la provincia de Eastern Cape en Sudáfrica (Fatoki & Awofolu, 2003) donde los valores máximos fueron de  $15 \mu\text{g/L}$  y el río Zanatenco, en el estado de Chiapas, donde las concentraciones máximas fueron de  $65 \mu\text{g/L}$  (Graniel & Carrillo, 2006).

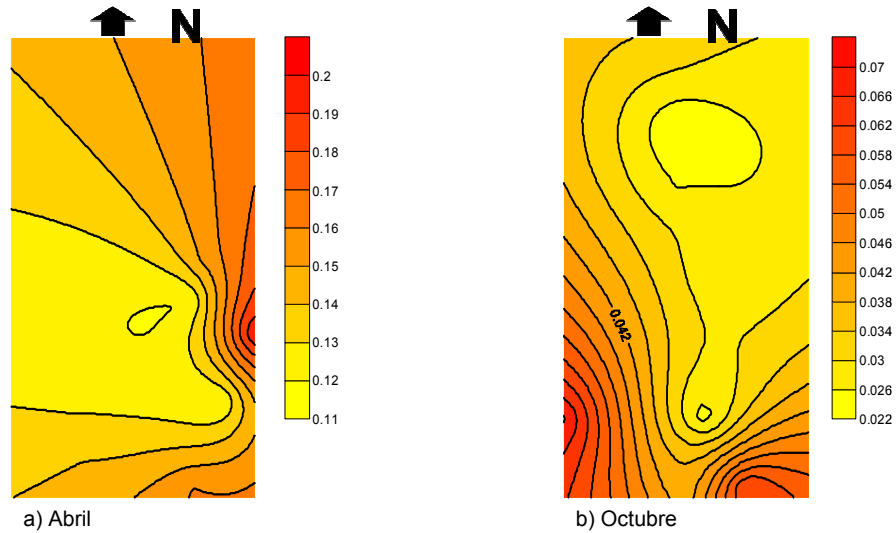


Figura 5.12 Mapa de contorno de la concentración de cadmio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.13 se observa la diferencia en los gradientes de concentración de cromo en ambos muestreos. En abril las concentraciones son mayores en la zona norte de la presa y en octubre la concentración mayor se encuentra en la parte central de la presa. Las concentraciones de cromo son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de  $2.73 \mu\text{g/L}$  y en octubre de  $0.98 \mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). La concentración máxima encontrada en La Purísima es mayor a los valores encontrados en la bahía Kastela, localizada el mar Adriático donde la concentración máxima fue de  $0.98 \mu\text{g/L}$  (Vukadin & Odzak, 1990) pero es menor a los valores encontrados en los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde los valores máximos fueron de 11 y  $15 \mu\text{g/L}$  respectivamente; el río Zanatenco, en el estado de Chiapas, con una concentración máxima de  $90 \mu\text{g/L}$  (Graniel & Carrillo, 2006) y en la presa Alzate, en el Estado de México donde las concentraciones máximas de cromo en agua alcanzaron los  $105 \mu\text{g/L}$  (Avila *et al.*, 1996).

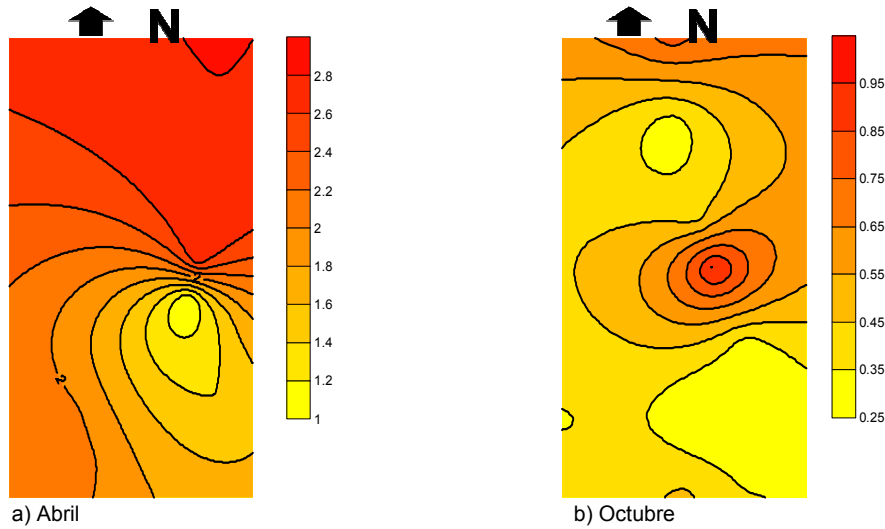


Figura 5.13 Mapa de contorno de la concentración de cromo en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.14 se observa que los gradientes de concentración de cobre, en ambos muestreos son muy parecidos, las concentraciones mayores se encuentran en la entrada del río, especialmente en octubre y disminuyen conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones de cobre son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de  $5.95 \mu\text{g/L}$  y en octubre de  $3.57 \mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Estos valores son superiores a los reportados en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de  $0.38 \mu\text{g/L}$  pero son menores a las concentraciones máximas en los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) con niveles de 15 y  $24 \mu\text{g/L}$  respectivamente; la presa Alzate, en el Estado de México donde las concentraciones máximas de cobre fueron de  $136 \mu\text{g/L}$  (Avila *et al.*, 1996) y el río Tinto en España donde se alcanzaron niveles máximos de  $64\ 000 \mu\text{g/L}$  (Nelson & Lamothe, 1993).

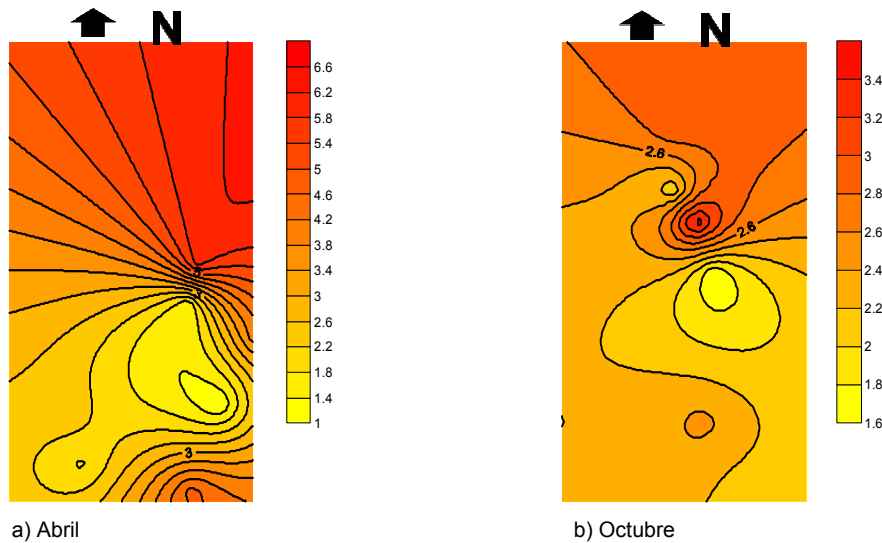


Figura 5.14 Mapa de contorno de la concentración de cobre en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.15 se observan los gradientes de concentración de hierro en abril y octubre, aunque son ligeramente diferentes, se aprecian las mayores concentraciones en la parte norte de la presa, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones de hierro son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de  $1\ 046.63\ \mu\text{g/L}$  y en octubre de  $501.50\ \mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Estas concentraciones superan los valores encontrados en el río Zanatenco, en el estado de Chiapas, donde las concentraciones máximas fueron de  $189\ \mu\text{g/L}$  (Graniel & Carrillo, 2006) pero son superadas en gran medida por las concentraciones máximas encontradas en los ríos de Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde fueron de  $3.97 \times 10^7\ \mu\text{g/L}$  y  $1.5 \times 10^6\ \mu\text{g/L}$  respectivamente y el río Tinto en España donde se alcanzaron niveles máximos de  $5.8 \times 10^7\ \mu\text{g/L}$  (Nelson & Lamothe, 1993).



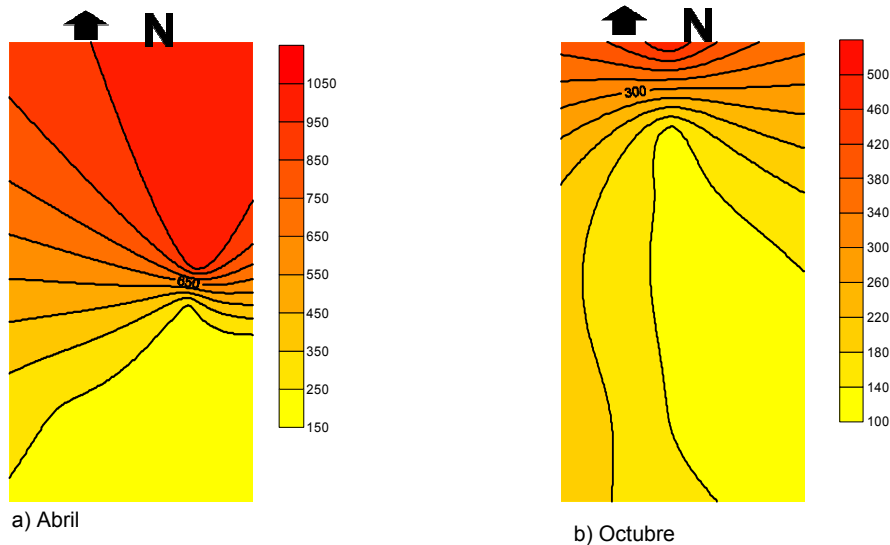


Figura 5.15 Mapa de contorno de la concentración de hierro en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.16 se observa el gradiente de concentración de mercurio obtenido para el muestreo de abril ya que en octubre las concentraciones estuvieron por debajo del límite de detección. Se aprecian las mayores concentraciones en la parte cercana a la cortina y su disminución conforme se avanza hacia la parte norte de la presa (hacia la entrada del río). La concentración máxima en abril fue de  $5 \mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Esta concentración es mayor que las presentadas en otros estudios como en el río Alabama, en Estados Unidos cuyas concentraciones máximas fueron de  $0.0038 \mu\text{g/L}$  (Warner *et al.*, 2005) y la presa Sandile en la provincia de Eastern Cape en Sudáfrica (Fatoki & Awofolu, 2003) donde fueron de  $4 \mu\text{g/L}$ .

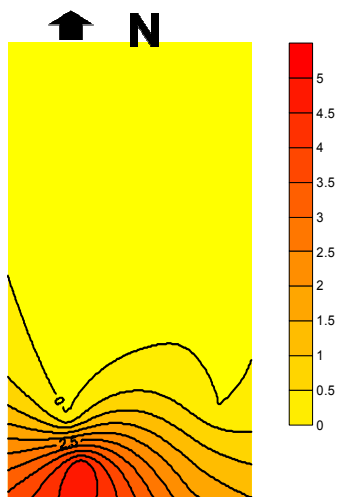


Figura 5.16 Mapa de contorno de la concentración de mercurio en las muestras de agua de la presa La Purísima en abril.

En la Figura 5.17 se observan los gradientes de concentración de litio en abril y octubre. Se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río en ambos muestreos aunque en abril. Las concentraciones de litio son menores durante la temporada de sequía (abril) y mayores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un aporte adicional o la liberación de litio del sedimento. La concentración máxima en abril fue de 6.18  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 27.55  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3).

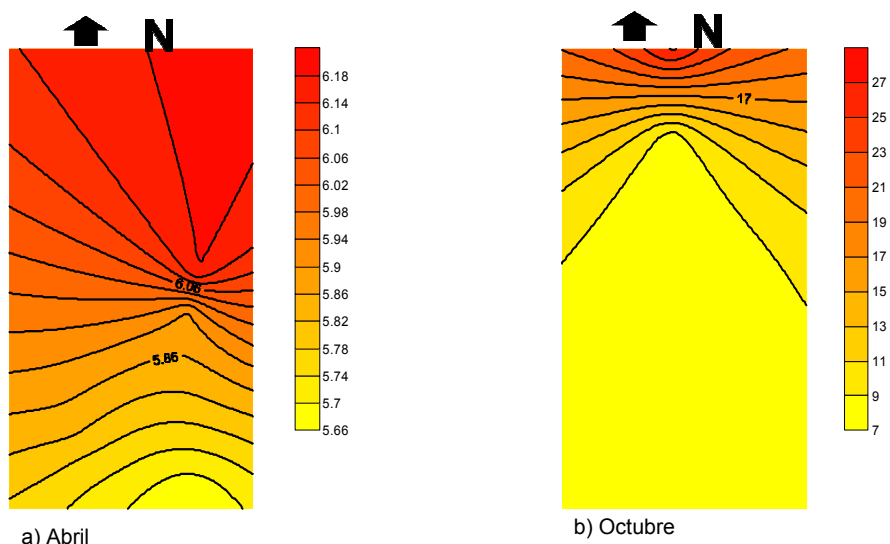


Figura 5.17 Mapa de contorno de la concentración de litio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

Los gradientes de concentración de níquel observados en la Figura 5.18 muestran las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones de níquel son similares durante la temporada de sequía (abril) y de lluvias (octubre). La concentración máxima en abril fue de 2.52  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 4.24  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Estas concentraciones superan los niveles encontrados en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 0.28  $\mu\text{g/L}$  pero es menor a la concentración máxima (45  $\mu\text{g/L}$ ) reportada en la presa Alzate, en el Estado de México (Avila *et al.*, 1996).

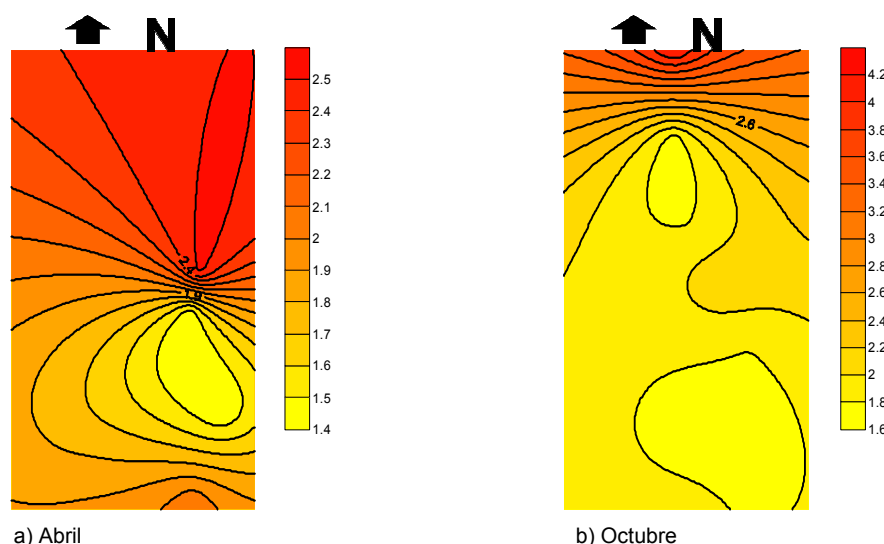


Figura 5.18 Mapa de contorno de la concentración de níquel en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.19 se observan los gradientes de concentración de plomo en abril y octubre, se aprecia que en abril las mayores concentraciones se encuentran en la entrada del río y hacia la parte central y en octubre se encuentran en la suroeste de la presa. Las concentraciones de plomo son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de 7.48  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 1.57  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). Las concentraciones máximas de plomo encontradas en la Purísima superan los valores reportados en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes &

Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 0.77  $\mu\text{g/L}$  pero son menores a los niveles de los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía y el río Tinto en España (Ackay *et al.*, 2003; Nelson & Lamothe, 1993) donde las concentraciones máximas fueron de 26, 32 y 500  $\mu\text{g/L}$  respectivamente.

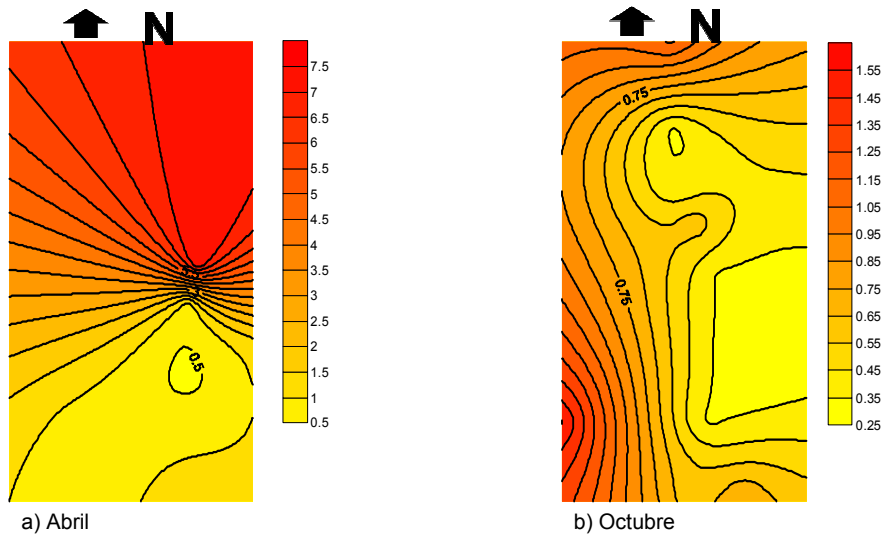


Figura 5.19 Mapa de contorno del la concentración de plomo en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.20 se observan los gradientes de concentración de antimonio en abril y octubre, se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones de antimonio son mayores durante la temporada de sequía (abril) y menores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a un efecto de dilución. La concentración máxima en abril fue de 1.28  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 1.07  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3).

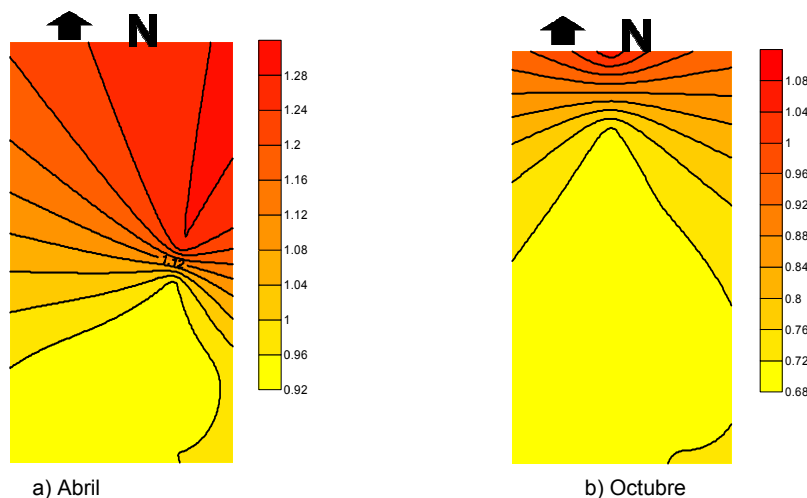


Figura 5.20 Mapa de contorno de la concentración de antimonio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.21 se observan las diferencias entre los gradientes de concentración de selenio en abril y octubre. En abril las concentraciones mayores se encontraron distribuidas a lo largo de la presa, especialmente en la parte este mientras que en octubre las concentraciones mayores fueron encontradas en la parte norte. Las concentraciones de selenio fueron menores durante la temporada de sequía (abril) y mayores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a una liberación del metal de los sedimentos o una fuente adicional en esta época. La concentración máxima en abril fue de 1.44  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 510.60  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3).

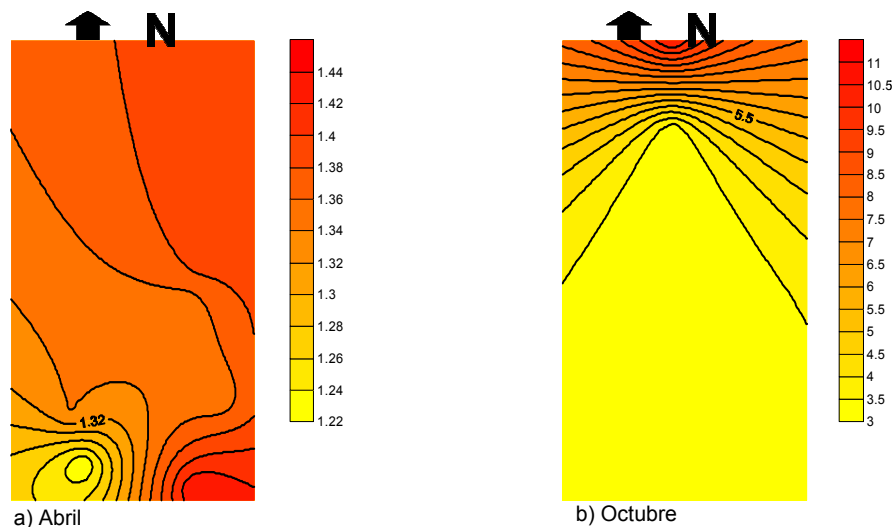


Figura 5.21 Mapa de contorno de la concentración de selenio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.22 se observan los gradientes de concentración de vanadio en abril y octubre, se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y en abril se extienden hacia la parte central pero en ambos muestreos la concentración disminuye conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones de vanadio son menores durante la temporada de sequía (abril) y mayores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a la liberación del metal de los sedimentos o un aporte adicional. La concentración máxima en abril fue de 7.12  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 12.95  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3).

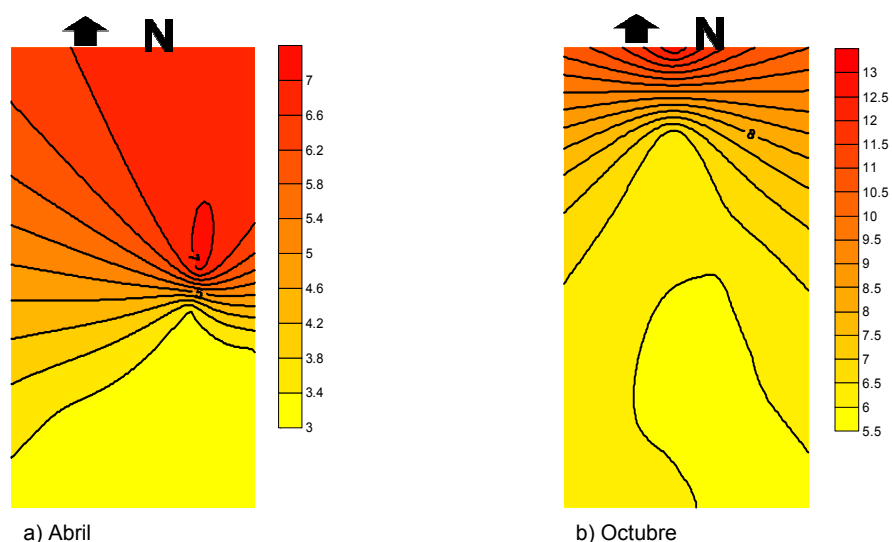


Figura 5.22 Mapa de contorno de la concentración de vanadio en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.23 se observa la diferencia entre los gradientes de concentración de zinc en abril y octubre. En abril se aprecian las concentraciones mayores focalizadas en la zona sureste de la presa y en octubre en la parte norte de la presa pero con valores más altos también en la parte central y suroeste. Las concentraciones de hierro son menores durante la temporada de sequía (abril) y mayores en la temporada de lluvias (octubre), posiblemente debido a una liberación del sedimento o un aporte adicional. La concentración máxima en abril fue de 101.96  $\mu\text{g/L}$  y en octubre de 531.65  $\mu\text{g/L}$  (Cuadro 5.3). El valor máximo de zinc en La Purísima es mayor que el encontrado en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de

2.19  $\mu\text{g/L}$ ; la presa Alzate, en el Estado de México donde la concentración máxima de zinc en agua fue de 109  $\mu\text{g/L}$  (Avila *et al.*, 1996); el río Zanatenco, en el estado de Chiapas, donde la concentración máxima fue de 167  $\mu\text{g/L}$  (Graniel & Carrillo, 2006); los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde las concentraciones máximas fueron de 100 y 275  $\mu\text{g/L}$  respectivamente; y la presa Sandile en la provincia de Eastern Cape en Sudáfrica (Fatoki & Awofolu, 2003) donde la concentración máxima fue de 372  $\mu\text{g/L}$ . Estos valores solo son superados por los encontrados en el río Tinto en España donde las concentraciones alcanzaron los 1 250 000  $\mu\text{g/L}$  (Nelson & Lamothe, 1993).

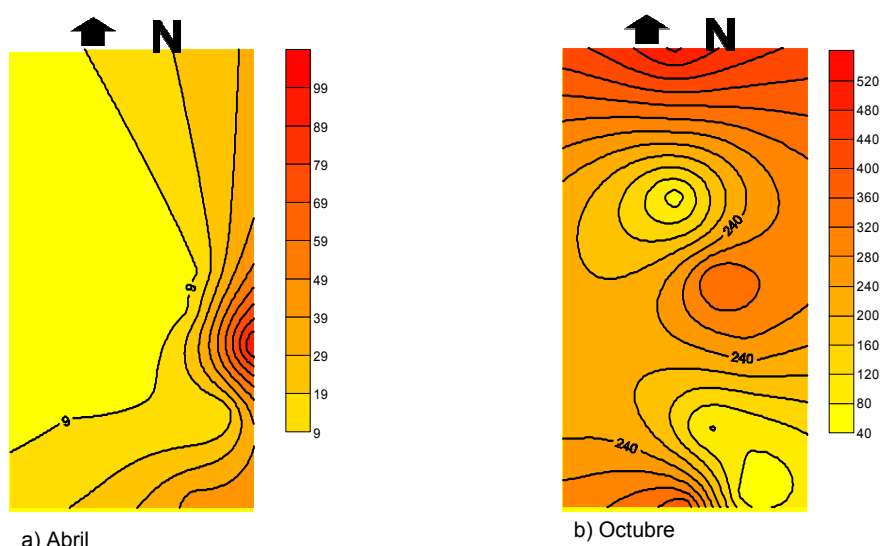


Figura 5.23 Mapa de contorno de la concentración de zinc en las muestras de agua de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En los Cuadros A.2 y A.3 del apéndice se resumen los coeficientes de correlación de Pearson para los metales en las muestras de agua en la presa La Purísima en el mes de abril y octubre respectivamente. En ambos cuadros se observa la presencia de correlaciones positivas por lo cual se realizó el análisis de componentes principales para cada uno de los muestreos.

En el Cuadro 5.4 se resumen los componentes principales para la concentración de metales en agua en el mes de abril donde se observa que se obtuvieron cuatro componentes principales que acumulan el 97.70 % del total de la varianza. El componente 1 está dominado por plata, arsénico, hierro, plomo, antimonio y vanadio y representan el 60.50% del total de la varianza. El

componente 2 explica el 17.96 % de la varianza total y está dominado por cadmio, selenio y zinc. El componente 3 está dominado por cadmio, cromo, mercurio y níquel y representa el 13.11 % del total de la variancia. En este componente se aprecia también que el selenio está correlacionado negativamente con el cadmio, el cromo y el mercurio. Finalmente, el componente 4 está dominado por cobre, litio, níquel, selenio y zinc explicando el 6.13 % del total de la variancia y también se aprecia la correlación negativa entre el cobre, níquel y selenio respecto al litio y al zinc.

Cuadro 5.4 Matriz de componentes principales para los datos de metales en agua de la presa La Purísima en abril.

<i>Elemento</i>	<i>Componente</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Ag	0.31	-0.16	0.16	0.18
As	0.31	0.19	-0.16	-0.08
Cd	0.12	0.49	0.36	0.25
Cr	0.26	-0.17	0.32	-0.04
Cu	0.29	0.23	0.16	-0.31
Fe	0.33	-0.17	-0.09	0.00
Hg	-0.09	-0.23	0.62	-0.13
Li	0.28	-0.07	-0.24	0.50
Ni	0.29	-0.07	0.27	-0.36
Pb	0.34	-0.10	-0.04	-0.03
Sb	0.34	0.01	-0.04	0.15
Se	0.14	0.42	-0.30	-0.52
V	0.33	-0.16	-0.11	0.06
Zn	0.02	0.56	0.24	0.35
Eigenvalores	8.47	2.52	1.84	0.86
Porcentaje de varianza	60.50	17.96	13.11	6.13
Porcentaje acumulativo	60.50	78.46	91.57	97.70

También se realizó un análisis de clusters donde se aprecian las cercanías entre los metales. Este análisis generó cuatro clusters numerados a continuación: 1) Ag – Cd; 2) Cr – Ni; 3) Sb – Se; 4) Cu – V (Figura 5.24).



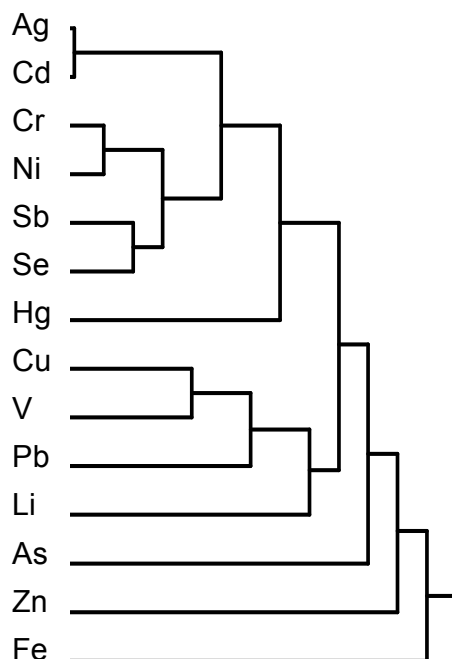


Figura 5.24. Dendrograma obtenido por el método de cluster para los catorce metales en agua de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril).

En el Cuadro 5.5 se resumen los componentes principales para la concentración de metales en agua en el mes de octubre donde se observa que se obtuvieron cuatro componentes principales que acumulan el 97.33 % del total de la varianza. El componente 1 está dominado por plata, arsénico, hierro, litio, níquel, antimonio, selenio y vanadio y representan el 69.20 % del total de la varianza. El componente 2 explica el 13.53 % de la varianza total y está dominado por cadmio y plomo. El componente 3 está dominado por cromo, cobre y zinc y representa el 10.42 % del total de la varianza. En este componente se aprecia también que el cromo y el zinc están correlacionados negativamente con el cobre. Finalmente, el componente 4 está dominado por cobre y zinc explicando el 4.18 % del total de la varianza.

Cuadro 5.5 Matriz de componentes principales para los datos de metales en agua de la presa La Purísima en octubre.

<i>Elemento</i>	<i>Componente</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Ag	0.33	-0.03	0.05	-0.15
As	0.33	-0.05	0.05	-0.14
Cd	-0.03	0.74	-0.03	0.01
Cr	0.19	-0.08	-0.61	0.29
Cu	0.11	-0.20	0.66	0.61
Fe	0.33	0.14	0.07	-0.06
Li	0.33	-0.04	0.06	-0.15
Ni	0.33	-0.01	-0.08	-0.05
Pb	0.17	0.61	0.15	0.25
Sb	0.33	-0.02	0.05	-0.12
Se	0.33	-0.02	0.05	-0.16
V	0.33	-0.04	0.07	-0.10
Zn	0.24	-0.06	-0.36	0.61
Eigenvalores	9.00	1.76	1.35	0.54
Porcentaje de varianza	69.20	13.53	10.42	4.18
Porcentaje acumulativo	69.20	82.74	93.15	97.33

En la Figura 5.25 se observan cuatro clusters generados para los metales en agua en el segundo muestreo (octubre): 1) Ag – Cd; 2) Cr – Sb; 3) Cu – Ni; 4) As – Li. Solo el primero coincide con el mes de abril, lo que parece indicar un comportamiento distinto de los metales en los diferentes muestreos.

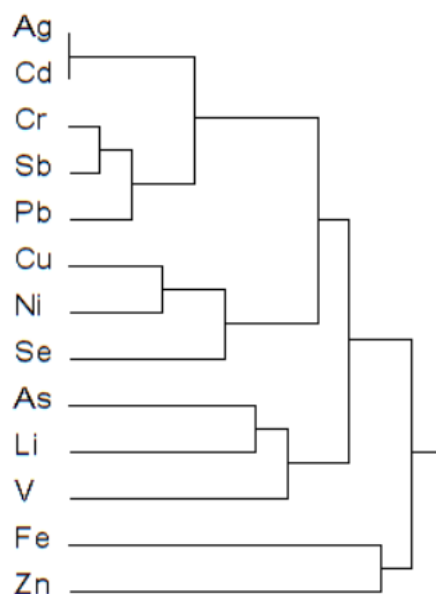


Figura 5.25. Dendrograma obtenido por el método de cluster para los trece metales en agua de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre).

### Caracterización de sedimento

En el Cuadro 5.6 se observa que los valores de humedad de los sedimentos en la presa se encuentran en un intervalo de 32.14 % (punto 10 en abril) hasta valores de 84.86 % (punto 2 en abril) teniendo promedios semejantes para ambos muestreos: 62.91 % en abril y 59.52 % en octubre. Los limos y arcillas predominan en el tamaño de partícula de los sedimentos (Cuadro 5.6) estando la mayoría de los puntos clasificados dentro de la textura franco arcillosa (punto 4 en abril y puntos 5, 6, 9 y 10 en octubre); arcilla limosa (punto 5 y 6 de abril y puntos 1, 2 y 4 en octubre); y franco limoso (puntos 8 y 9 en abril y puntos 7 y 8 en octubre); tres puntos más (1, 2 y 3 en abril) se clasifican como arcillas; el punto 3 en octubre es franco y en abril el punto 7 es arena y el punto 10 es franco arenoso.

**Cuadro 5.6 Resultados de los parámetros en muestras de sedimento de la presa La Purísima**

Puntos de muestreo	Fósforo soluble (mg/kg)		Sulfuros totales (mg/kg)		Humedad (%)		Tamaño de partícula									
							limos (%)		arcillas (%)		arenas (%)		limos (%)		arcillas (%)	
	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre
1	3.44	1.72	950.24	1271.65	76.29	70.76	24.34	29.30	46.36	2.54	40.93	56.53				
2	3.52	0.07	2447.73	807.99	84.86	65.50	19.74	20.64	59.62	1.40	47.82	50.78				
3	3.97	ND	1282.79	692.26	84.55	66.73	15.87	31.02	53.11	29.90	44.64	25.46				
4	2.59	0.35	523.65	1108.99	81.08	65.27	21.73	46.26	32.01	7.11	48.62	44.27				
5	4.65	ND	390.23	1366.76	72.81	59.32	6.76	42.40	50.84	0.76	68.26	30.98				
6	ND	0.58	1002.86	722.75	74.76	46.33	8.54	46.59	44.88	33.52	38.22	28.26				
7	2.13	0.44	0.75	223.16	35.95	44.57	73.75	24.08	2.17	13.25	62.06	24.69				
8	5.56	0.82	19.09	474.05	40.46	53.82	25.95	70.14	3.91	1.71	71.69	26.60				
9	9.32	ND	3.99	321.72	46.19	49.34	40.93	53.98	5.09	0.55	67.87	31.58				
10	5.61	2.02	1.89	951.85	32.14	73.56	87.21	11.51	1.28	31.86	56.12	12.02				

ND: No detectado

De acuerdo a la clasificación de la normatividad mexicana para suelos (NOM-021-RECNAT-2000) el punto 8, 9 y 10 en abril tienen concentraciones medias de fósforo soluble (5.5 a 11 mg/kg) y el resto de los puntos de muestreo se considera bajo (menor a 5.5 mg/kg). Las concentraciones de fósforo en los sedimentos en el mes de abril se encontraron en niveles de no detectable a 9.32 mg/kg con un promedio de 4.08 mg/kg y en octubre fueron menores (ND a 2.02 mg/kg) con un promedio de 0.60 mg/kg (Cuadro 5.6). En la Figura 5.26 se observan las mayores concentraciones de fósforo en la parte norte de la presa (en la entrada del río) y en la parte sur (cercana a la compuerta) en ambos muestreos y considerando la cercanía de esos lugares a los cultivos observados en campo podrían sugerir como fuente primordial el uso de fertilizantes.

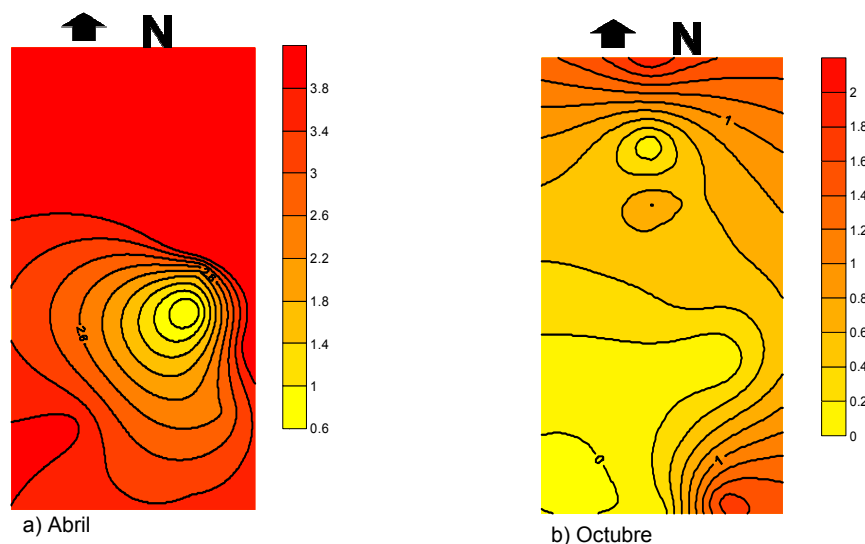


Figura 5.26 Mapa de contorno de la concentración de fósforo soluble en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

La concentración de sulfuros totales fue muy variable entre los puntos de muestreo, especialmente en el mes de abril cuyo intervalo de concentración fue de 0.75 a 2 447.73 mg/kg y un promedio de 662.32 mg/kg (Cuadro 5.6). Para el mes de octubre las concentraciones se encontraron de 223.16 a 1366.76 mg/kg con un promedio de 386.90 mg/kg. En la Figura 5.27 se observa que las mayores concentraciones de sulfuro se encuentran en la parte sur de la presa en ambos muestreos, esto se explica considerando que son las partes más profundas de la presa y las concentraciones de oxígeno a esas profundidades son menores.

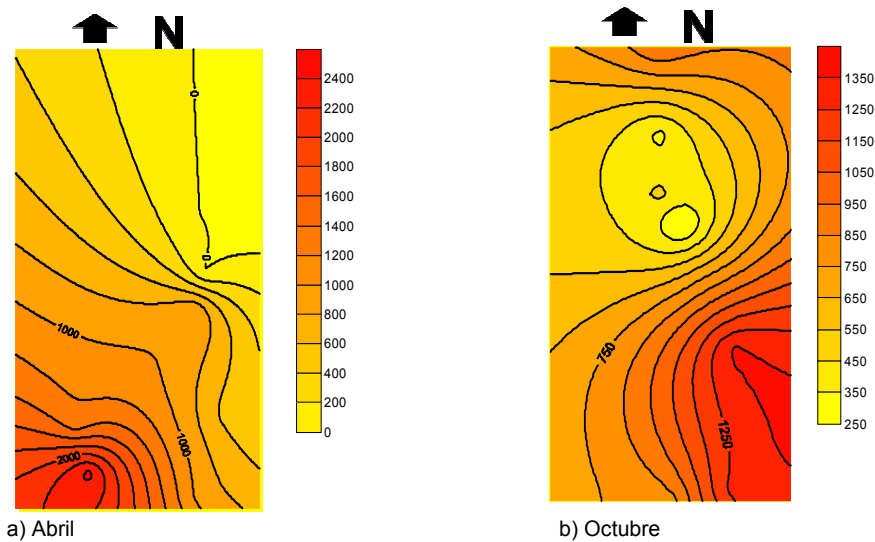


Figura 5.27 Mapa de contorno de la concentración de sulfuros totales en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

Las concentraciones de carbono total en los sedimentos en abril se encontraron en un intervalo de 14.29 a 120.90 mg/g (Cuadro 5.7) con un promedio de 63.78 mg/g. Las concentraciones mayores de carbono (Figura 5.28a) se localizaron en el área sur de la presa, lo cual podría derivarse de la mayor acumulación del material en esta zona cercana a la cortina de la presa.

Por otra parte, las concentraciones de sulfato fueron muy variables desde 10.87 mg/kg (punto 7) hasta 258.04 mg/kg (punto 2), este punto sobrepasa el intervalo de 100 a 200 mg/kg que el Reino Unido (ASTM, 1996) considera como valores comunes en suelos no contaminados. Así mismo, se observa (Figura 5.28b) que el sulfato al igual que el carbono total (con quien presenta una correlación positiva de 0.61), presenta las concentraciones mayores en la parte sur de la presa lo cual también se encuentra muy ligado a la presencia de sulfuros (correlación de 0.78).

Cuadro 5.7 Resultados de los parámetros en muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril (primer muestreo)

<i>Puntos de muestreo</i>	<i>Carbono total (mg/g)</i>	<i>Sulfato (mg/kg)</i>	<i>Bromuro (mg/kg)</i>	<i>Cloruro (mg/kg)</i>
1	116.52	155.73	4.26	59.77
2	90.85	258.04	9.57	7.85
3	120.90	98.12	29.39	142.72
4	98.31	150.00	9.14	ND
5	54.58	111.28	ND	ND
6	47.09	56.95	ND	11.43
7	26.34	10.87	ND	72.11
8	35.55	NR	NR	NR
9	33.36	NR	NR	NR
10	14.29	NR	NR	NR

ND: No detectado; NR: No realizado

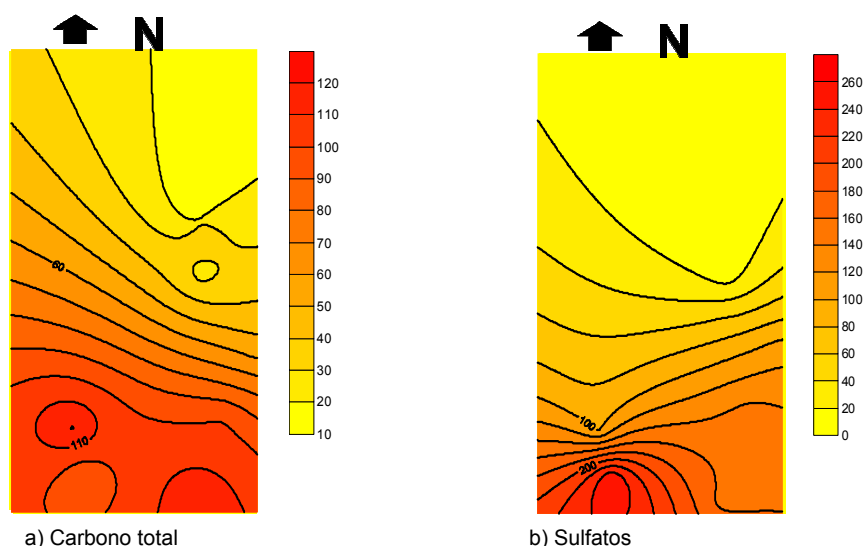


Figura 5.28 Mapa de contorno de la concentración de a) carbono total y b) sulfatos en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril

Las concentraciones de bromuro en los sedimentos de abril (Cuadro 5.7) se encontraron desde no detectables (puntos 5, 6 y 7) hasta 29.39 mg/kg (punto 3) y las concentraciones de cloruro fueron muy variables desde no detectables (punto 4 y 5) hasta 142 mg/kg (punto 3), ambos parámetros se encuentran correlacionados de manera positiva (0.69) y se aprecia que sus concentraciones mayores son localizadas en la parte suroeste de la presa (figura 5.29).

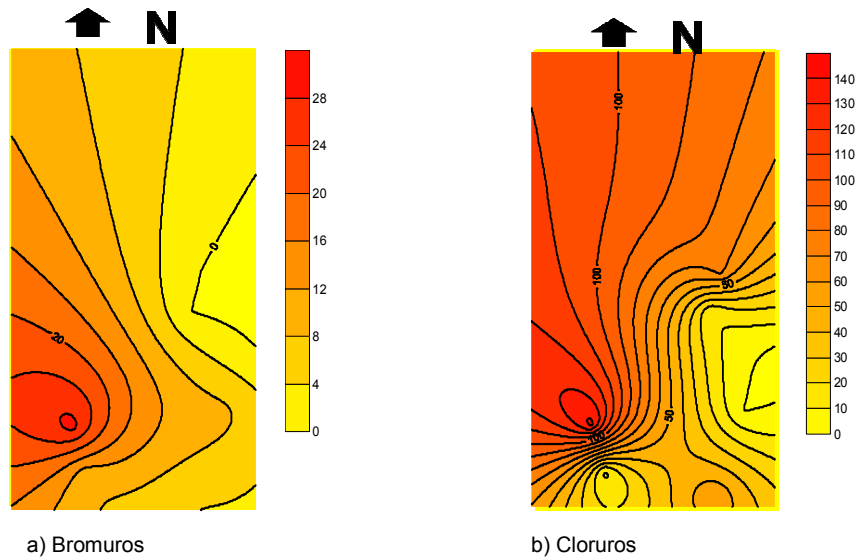


Figura 5.29 Mapa de contorno de la concentración de a) bromuros y b) cloruros en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en abril

Por otra parte, las concentraciones de plaguicidas organoclorados y fosforados en las muestras de sedimento resultaron por abajo del límite de detección pero en una de las muestras (punto 8 en abril) se encontraron hidrocarburos fracción media en una concentración de 999 mg/kg. Esta concentración no supera los valores límites (1 200 mg/kg) para uso de suelo residencial- agrícola que estipula la normatividad mexicana (NOM 138-SEMARNAT/SS-2003) pero es indicativa de una contaminación posiblemente originada por el combustible diesel utilizado en las lanchas de motor de los pescadores de la zona.

### Metales en sedimentos

En el Cuadro 5.8 se presentan estadísticos descriptivos de las concentraciones de metales encontradas en sedimento durante los dos muestreos y debido a que no existe una normatividad mexicana para establecer límites permisibles de contaminantes en sedimentos, se presentan los criterios de intervalo de efecto bajo (ERL) propuestos por Long, *et al.* (1995) que utiliza para su clasificación los datos disponibles sobre los efectos tóxicos que provocan los contaminantes individuales sobre los organismos bentónicos. Así mismo se



observan en el cuadro los valores máximos permitidos por la normatividad mexicana para la remediación de suelos contaminados para uso agrícola-residencial-comercial (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y los límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final en su categoría de excelentes (NOM-004-SEMARNAT-2002).

En el Cuadro 5.8 se distingue un intervalo amplio de valores para las concentraciones de mercurio principalmente en el mes de octubre, cuyo coeficientes de variación fue mayor a 1 lo que podría indicar una fuente diferente al resto de los metales cuyo coeficiente de variación es menor a 1 (Yongming *et al.*, 2006). Las concentraciones de plata, arsénico, cadmio, cromo, cobre, níquel, plomo, selenio y zinc encontradas en la presa La Purísima son bajas y no se acercan a los límites máximos permisibles por la normatividad mexicana pero la plata, el cromo, níquel, plomo, y zinc superan los criterios propuestos por Long *et al.* (1995) lo cual indica que dichos metales podrían ocasionar un efecto adverso en los organismos bentónicos. Por el contrario, las concentraciones de mercurio superan la normatividad en 4 puntos en abril (puntos 2, 7,8 y 10) y 4 puntos en octubre (puntos 6, 7, 8 y 9), igualmente, las concentraciones de mercurio superan los criterios de Long *et al.* (1995) en todos los puntos muestreados. También las concentraciones de vanadio en la mayoría de las muestras (excepto el punto 1 en abril y los puntos 3, 4 y 5 en octubre) superan la concentración límite que marca la normatividad mexicana y en ciertos puntos inclusive duplican dicho valor. Por otra parte, los valores de hierro, litio, antimonio y uranio no pueden ser comparados por falta de una normatividad que los incluya.

Cuadro 5.8 Concentraciones de metales en sedimento de la presa La Purísima\*

Elemento	Concentración máxima		Concentración mínima				Promedio		Desviación estándar		Valor límite		Normatividad
	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	Abril	Octubre	
Ag	3.68	6.78	0.79	0.89	2.32	3.23	1.10	1.96	1	390	1	390	Long, et al., 1995 NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
As	1.17	1.87	0.64	ND	0.86	0.68	0.17	0.54	8.2	41	8.2	41	Long, et al., 1995 NOM 004-SEMARNAT-2002
Cd	0.43	0.77	0.22	0.26	0.31	0.48	0.07	0.17	22	1.2	22	1.2	NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 Long, et al., 1995
Cr	108.18	109.91	27.04	33.46	63.76	67.01	30.70	30.74	37	81	37	81	Long, et al., 1995 / NOM 004-SEMARNAT-2002 NOM 004-SEMARNAT-2002 NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
Cu	106.75	157.38	20.25	23.40	54.94	74.45	31.17	49.21	1200	280(C <sup>6+</sup> )	1200	280(C <sup>6+</sup> )	Long, et al., 1995 / NOM 004-SEMARNAT-2002 NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
Fe	5.74	5.83	2.78	2.92	4.14	4.17	1.01	0.91	34	1500	34	1500	Long, et al., 1995 / NOM 004-SEMARNAT-2002 NA
Hg	35.36	58.80	2.43	1.70	14.51	19.49	12.79	21.12	0.15	17	0.15	17	Long, et al., 1995 NOM 004-SEMARNAT-2002
Li	85.74	101.36	39.51	57.86	65.21	79.63	14.86	13.96	23	NA	23	NA	NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 NA
Ni	50.41	50.25	13.97	14.61	29.13	29.99	12.41	12.94	20.9	420	20.9	420	Long, et al., 1995 NOM 004-SEMARNAT-2002
Pb	95.72	146.03	29.47	26.87	56.86	65.60	23.21	36.70	1600	46.7	1600	46.7	NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 Long, et al., 1995
Sb	9.15	7.74	3.29	2.10	6.61	4.38	2.13	1.70	300	400	300	400	NOM 004-SEMARNAT-2002 NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
Se	3.37	0.31	0.89	0.10	2.04	0.22	0.87	0.06	NA	390	NA	390	NOM 004-SEMARNAT-2002 NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
U	2.88	3.22	0.95	1.43	1.84	2.16	0.72	0.75	NA	78	NA	78	NA NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004
V	182.13	177.28	68.32	59.58	120.46	109.03	42.49	43.60	150	2800	150	2800	Long, et al., 1995 NOM 004-SEMARNAT-2002

\*Concentraciones en mg/kg a excepción de Fe (%); ND: No detectado; NA: No aplica

En la Figura 5.30 se observan los gradientes de concentración de plata en abril y octubre y se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). En un estudio realizado en el 2005 en la presa La Purísima por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, las concentraciones de plata se encontraron por debajo de los límites de detección (0.1 mg/kg). La concentración máxima de plata encontrada en el mes de octubre en La Purísima (Cuadro 6.8) supera ligeramente la concentración máxima (6.4 mg/kg) reportada en sedimentos del puerto de Sydney en Australia (McCready *et al.*, 2006).

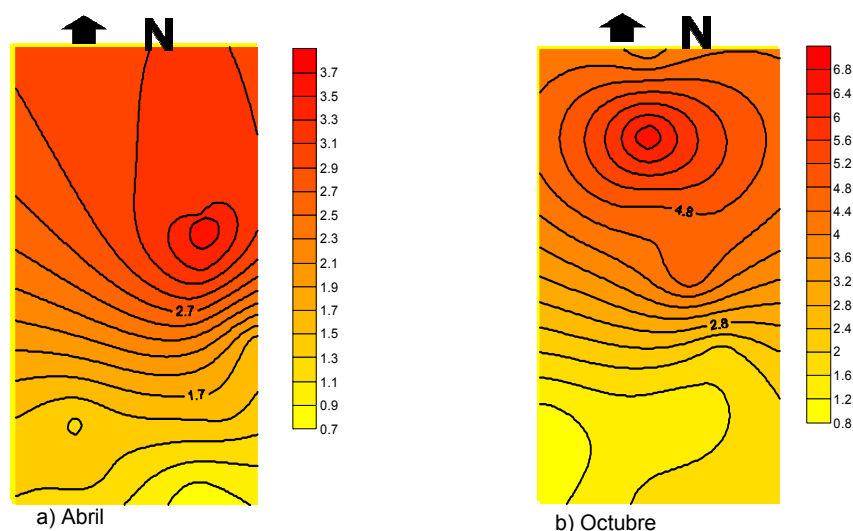


Figura 5.30 Mapa de contorno de la concentración de plata en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.31 se observan los gradientes de concentración de arsénico en abril y octubre. Se aprecian las variaciones entre un muestreo y otro pues mientras en abril las concentraciones mayores se observan en la parte noreste y suroeste de la presa, en octubre las concentraciones son mayores en el extremo norte y el extremo sur. Los niveles de arsénico en los sedimentos en este estudio son superados ampliamente por las concentraciones encontradas en el 2005 en esta misma presa (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) donde se encontraron concentraciones de arsénico en un intervalo de 17 a 62.2 mg/kg. La concentración máxima de arsénico encontrada en el presente

estudio fue superada ligeramente por los valores encontrados en otros sitios como en el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) donde se encontraron valores máximos de 9.5 mg/kg; en sedimentos marinos de la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 10 mg/kg; las lagunas de San José y Joyuna en Puerto Rico donde los valores máximos encontrados fueron de 24 y 29.5 mg/Kg respectivamente (Acevedo *et. al*, 2006); el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 48 mg/kg (McCready *et al.*, 2006) y en sedimentos de la presa Aguamilpa en Nayarit donde las concentraciones fueron de 14 120 mg/kg y 13 190 mg/kg en época de estiaje y lluvias respectivamente (Zambrano *et al.*, 2004).

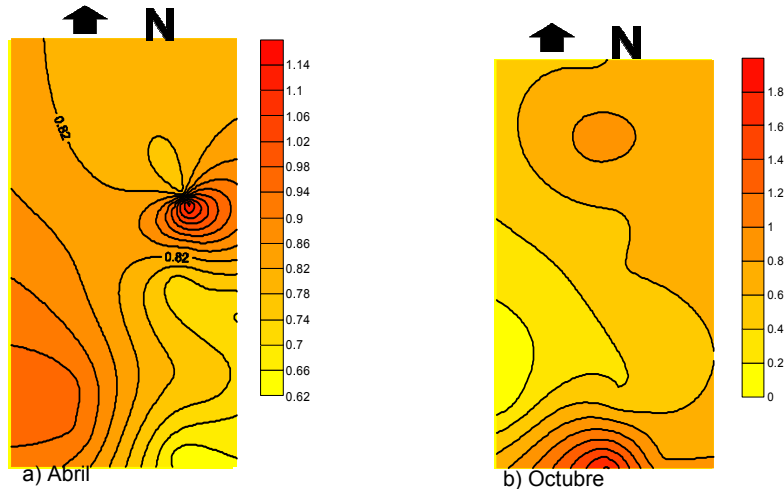


Figura 5.31 Mapa de contorno de la concentración de arsénico en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

El gradiente de cadmio fue diferente en los muestreos (Figura 5.32). En abril, las concentraciones fueron mayores en la parte central de la presa y en octubre se encontraron en la parte norte de la presa (en la entrada del río). En un estudio realizado en el 2005 en la presa La Purísima por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato, las concentraciones de cadmio se encontraron por debajo de los límites de detección (0.1 mg/kg). La concentración máxima encontrada en La Purísima supera los niveles reportados en la presa Umtata en la provincia de Eastern Cape en Sudáfrica (Fatoki & Awofolu, 2003) donde los niveles máximos fueron de 0.003 mg/kg; en la Gran

Barrera de Arrecifes en Australia donde la concentración máxima fue de 0.01 mg/Kg (Haynes & Johnson, 2000) y la laguna Joyuna en Puerto Rico donde los valores máximos fueron de 0.17 mg/kg (Acevedo *et. al*, 2006). Por otra parte, las concentraciones en La Purísima son superadas por los valores encontrados en los sedimentos marinos del estado de Sonora donde la concentración máxima fue de 2.64 mg/kg (Domínguez *et al.*, 2004); el río de Coatzacoalcos donde se encontraron concentraciones máximas de 2.83 mg/kg (Bahena & Rosales, 2002); las costas del estado de Yucatán donde se encontraron concentraciones máximas de 2.95 mg/kg (Medina *et al.*, 2004); la laguna de San José en Puerto Rico donde se encontraron valores máximos de 4.7 mg/kg (Acevedo *et. al*, 2006); las costas de zonas ostrícolas en Guaymas, Sonora donde se encontraron concentraciones de 5.62 mg/kg (García *et al.*, 2004); la presa Alzate, en el Estado de México donde la concentración máxima fue de 6.55 mg/kg (Avila *et al.*, 1997); el río Columbia, en Estados Unidos donde se encontraron valores máximos de 7.5 mg/kg (Delistraty & Yokel, 2007); el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 10 mg/kg (McCready *et al.*, 2006); y la presa Wadi Al-Arab en Jordania donde se encontraron valores máximos de 13 mg/kg (Ghrefat & Yusuf, 2006).

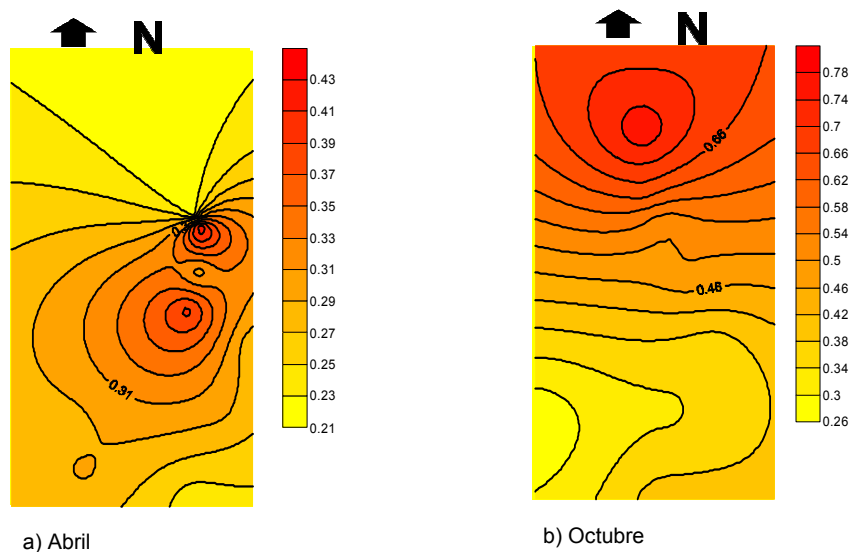


Figura 5.32 Mapa de contorno de la concentración de cadmio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.33 se observa que los gradientes de concentración de cromo en ambos muestreos son muy parecidos, las concentraciones mayores se encuentran en la entrada del río, especialmente en octubre y disminuye conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Los valores máximos de cromo encontrados en octubre en La Purísima, superan la concentración máxima (2.2 mg/kg) encontrada en esta misma presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) y los valores reportados en las costas del estado de Yucatán donde las concentraciones máximas fueron de 6.37 mg/kg (Medina *et al.*, 2004); la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 8 mg/kg; la bahía Kastela, en el mar Adriático (Vukadin & Odzak, 1990) donde las concentraciones máximas fueron de 60.60 mg/kg y el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) donde se encontraron valores máximos de 90 mg/kg. Por otra parte, estos niveles son menores a las concentraciones máximas encontradas en la presa Alzate, en el Estado de México donde las concentraciones máximas de cromo en sedimento fueron de 165 mg/kg (Avila *et al.*, 1997); los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde las concentraciones máximas fueron de 195 y 212 mg/kg respectivamente; el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 298 mg/kg (McCready *et al.*, 2006) y se encuentran muy por debajo de los valores promedio en la presa Aguamilpa en Nayarit (Zambrano *et al.*, 2004) donde las concentraciones fueron de 33 300 mg/kg y 15 100 mg/kg en época de estiaje y lluvias respectivamente.

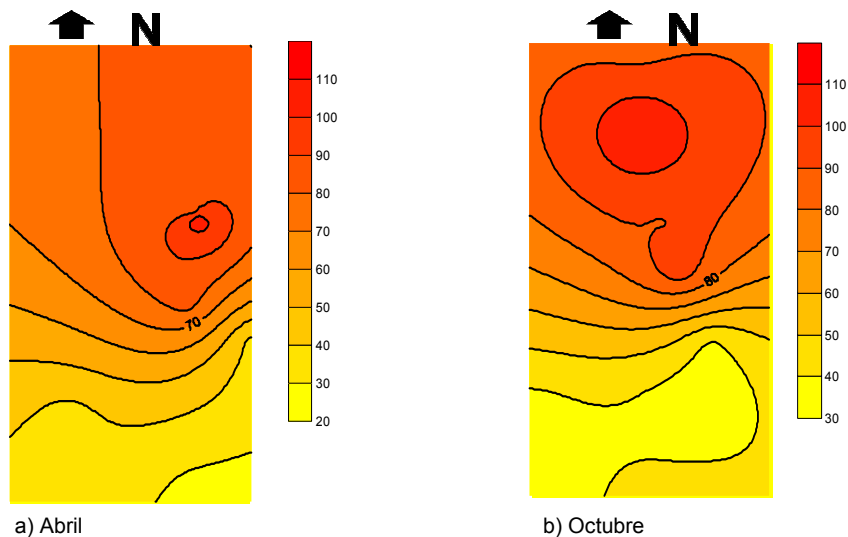


Figura 5.33 Mapa de contorno de la concentración de cromo en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.34 se observa que los gradientes de concentración de cobre, en ambos muestreos son muy parecidos, las concentraciones mayores se encuentran en la entrada del río, especialmente en octubre y disminuyen conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). La concentración máxima encontrada en La Purísima es mayor a la reportada en las costas del estado de Yucatán donde se encontraron concentraciones máximas de 2.53 mg/kg (Medina *et al.*, 2004); las costas del estado de Sonora donde se encontraron concentraciones máximas de 14.85 mg/kg (Domínguez *et al.*, 2004; García *et al.*, 2004); la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 32 mg/kg; la laguna de Joyuna en Puerto Rico donde las concentraciones máximas fueron de 33 mg/kg (Acevedo *et al.*, 2006); el río de Coatzacoalcos con concentraciones máximas de 42.2 mg/kg (Bahena & Rosales, 2002); el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) donde se encontraron valores máximos de 48 mg/kg; la presa Alzate, en el Estado de México con concentraciones máximas de 95 mg/kg (Avila *et al.*, 1997; Barceló *et al.*, 2002) y los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde las concentraciones máximas fueron de 145 y 152 mg/kg respectivamente. Por otra parte, estas concentraciones son menores a las reportadas en la presa

Wadi Al-Arab en Jordania (Ghrefat & Yusuf, 2006) donde se encontraron valores máximos de 190 mg/kg; la Laguna de San José en Puerto Rico (Acevedo *et al.*, 2006) con valores máximos de 211 mg/kg; el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 1 060 mg/kg (McCready *et al.*, 2006) y la presa Aguamilpa en Nayarit (Zambrano *et al.*, 2004) donde las concentraciones máximas alcanzan los 36 990 y 30 850 mg/kg en época de estiaje y lluvias respectivamente.

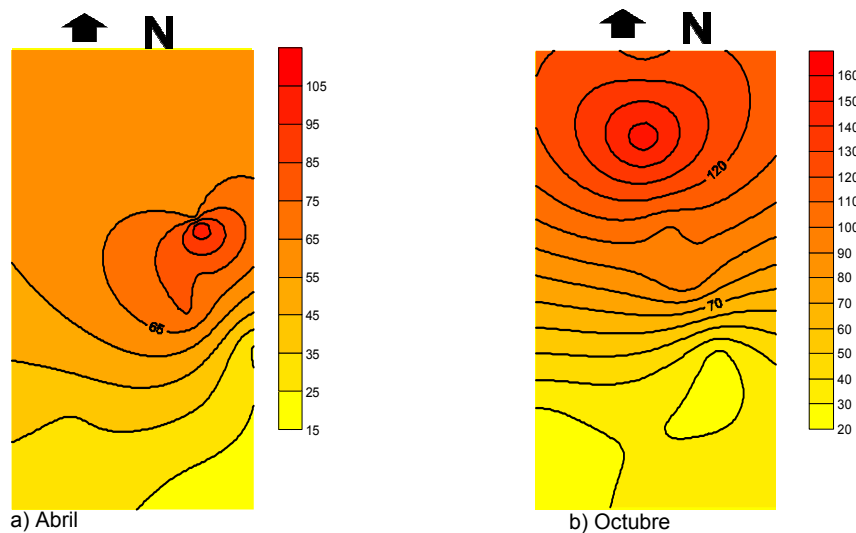


Figura 5.34 Mapa de contorno de la concentración de cobre en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.35 se observan los gradientes de concentración de hierro en abril y octubre y aunque son ligeramente diferentes, se aprecian las mayores concentraciones en la parte norte de la presa, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). La concentración máxima en La Purísima supera los valores encontrados en las costas del estado de Sonora donde la concentración máxima de hierro fue de 0.90% (Domínguez *et al.*, 2004); la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) con concentración máxima de 1.60 %; la presa Wadi Al-Arab en Jordania (Ghrefat & Yusuf, 2006) donde se reportaron valores máximos de 1.78 %; los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde las concentraciones máximas fueron de 2.55 y 2.87 % respectivamente; la presa



Alzate en el Estado de México (Avila *et al.*, 1997; Barceló *et al.*, 2002) con valores máximos cercanos al 4 %; la laguna de San José en Puerto Rico (Acevedo *et. al.*, 2006) donde se encontraron valores máximos de 4.6 %. Por otra parte, estos valores son menores a los reportados en la presa Aguamilpa en Nayarit (Zambrano *et al.*, 2004) donde las concentraciones promedio fueron de 6.5 y 6.2 % en época de estiaje y lluvias respectivamente; la laguna Joyuna en Puerto Rico donde se encontraron concentraciones máximas de 7.2 % (Acevedo *et. al.*, 2006).

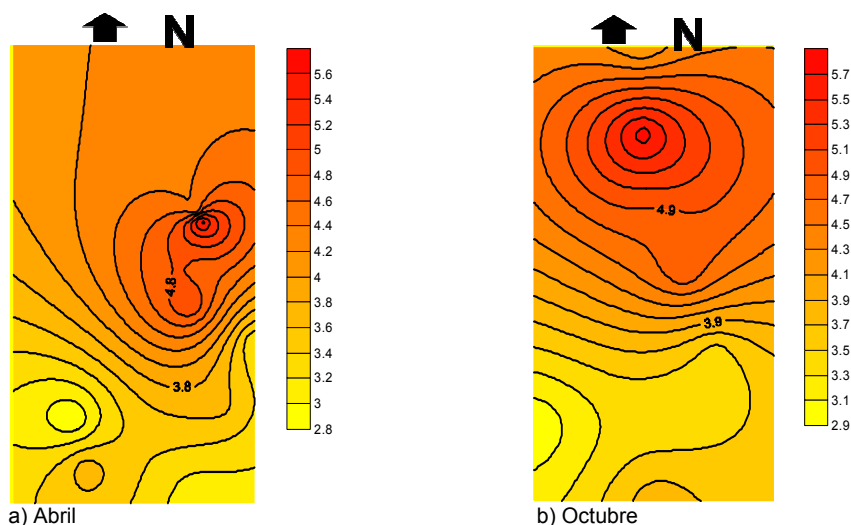


Figura 5.35 Mapa de contorno de la concentración de hierro en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.36 se observan los gradientes de concentración de mercurio en abril y octubre. Se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina) pero en el mes de abril también hay una importante concentración de mercurio en la zona suroeste de la presa. Las concentraciones máximas de mercurio superan la concentración máxima (0.107 mg/kg) encontrada en esta misma presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) y son muy superiores a los valores reportados en otros estudios como en la presa Alzate, en el Estado de México donde la concentración máxima fue de 0.054 mg/kg (Avila *et al.*, 1997); el río Alabama, en Estados Unidos cuyas concentraciones máximas de mercurio total fueron de 0.104 mg/kg (Warner *et al.*, 2005); las lagunas Joyuna y San José en

Puerto Rico con concentraciones máximas de 0.3 y 4.9 mg/kg respectivamente (Acevedo *et. al.*, 2006); el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 5.9 mg/kg (McCready *et al.*, 2006).

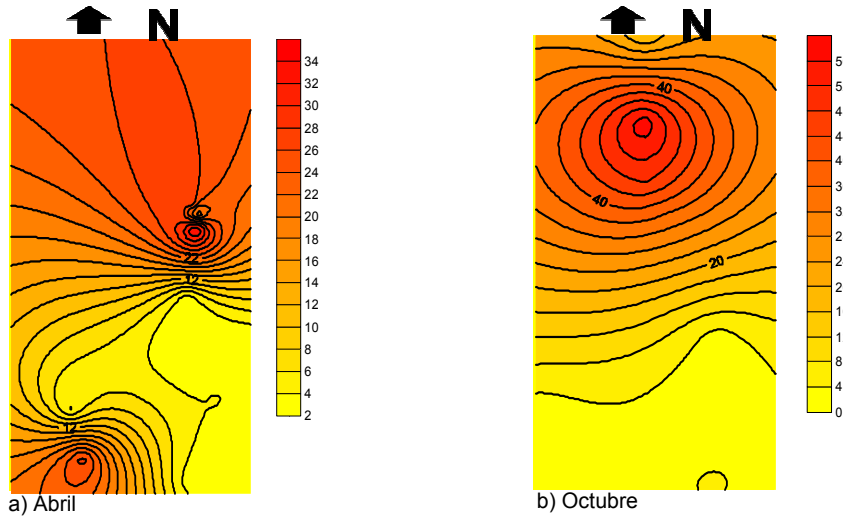


Figura 5.36 Mapa de contorno de la concentración de mercurio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.37 se observan los gradientes de concentración de litio en abril y octubre. Se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río en octubre y en abril las concentraciones mayores se encuentran más cercanas a la parte central de la presa.

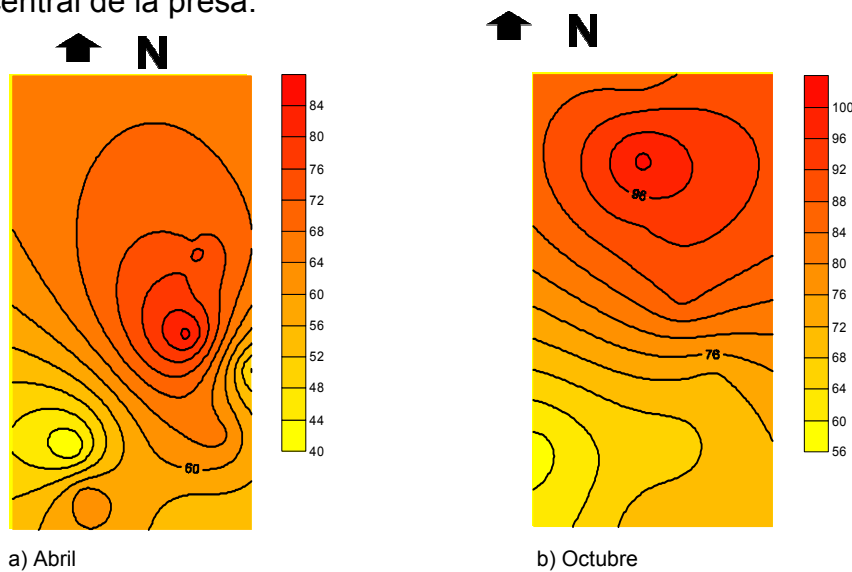


Figura 5.37 Mapa de contorno de la concentración de litio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

Los gradientes de concentración de níquel observados en la Figura 5.38 muestran las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). La concentración máxima de níquel en La Purísima supera las concentraciones encontradas en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 0.28 mg/kg; la presa Alzate, en el Estado de México donde la concentración máxima fue de 11 mg/kg (Avila *et al.*, 1997) y en el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) con concentraciones máximas de 45 mg/kg. Por otra parte, estos valores son menores en comparación de los encontrados en el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 75 mg/kg (McCready *et al.*, 2006; los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde las concentraciones máximas fueron de 418 y 129 mg/kg respectivamente y son superados ampliamente por los encontrados en la presa Aguamilpa en Nayarit (Zambrano *et al.*, 2004) donde las concentraciones máximas fueron de 29 400 y 13 200 mg/kg en época de estiaje y lluvias respectivamente.

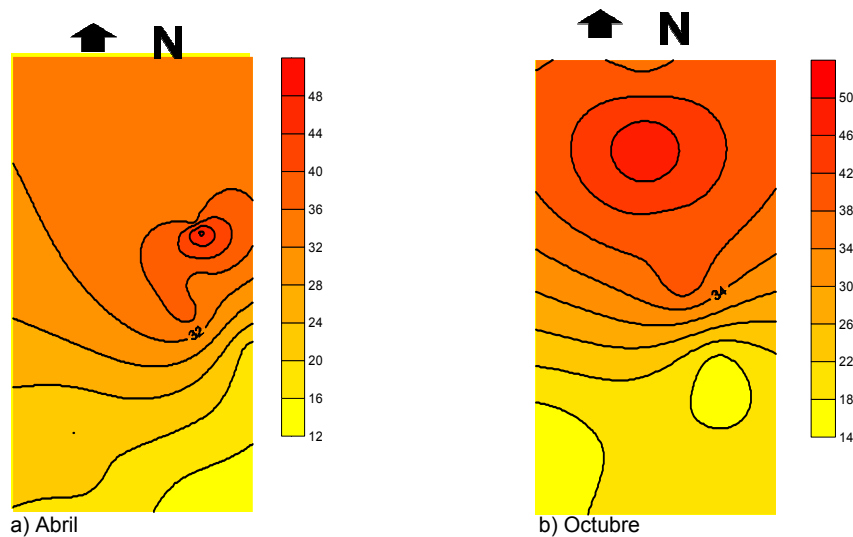


Figura 5.38 Mapa de contorno de la concentración de níquel en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.39 se observan los gradientes de concentración de plomo en abril y octubre y se aprecia que en octubre las mayores concentraciones se encuentran en la entrada del río y en abril en la parte central de la presa, pero

para ambos casos las concentraciones disminuyen conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina). Las concentraciones máximas de plomo encontradas en la Purísima superan la concentración máxima (78 mg/kg) encontrada en esta misma presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) y superan los valores reportados en la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 8.6 mg/kg; la laguna Joyuna en Puerto Rico donde la concentración máxima es de 10.4 mg/kg (Acevedo *et. al.*, 2006); las costas del estado de Yucatán donde se encontraron concentraciones máximas de 28.53 mg/kg (Medina *et al.*, 2004); las costas de Sonora donde se encontraron concentraciones máximas de 46.55 mg/kg (Domínguez *et al.*, 2004; García *et al.*, 2004); el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) donde se encontraron valores máximos de 52 mg/kg; la presa Alzate, en el Estado de México donde la concentración máxima fue de 57 mg/kg (Avila *et al.*, 1997); el río Coatzacoalcos donde se encontraron concentraciones máximas de 57.7 mg/Kg (Bahena & Rosales, 2002) y el río Buyak Menderes en Turquía donde la concentración máxima fue de 75 mg/kg (Ackay *et al.*, 2003). Por el contrario, estos valores son menores a los reportados en el río Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) donde la concentración máxima fue de 149 mg/kg; la laguna de San José en Puerto Rico (Acevedo *et. al.*, 2006) donde las concentraciones máximas fueron de 548 mg/kg; el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 1 426 mg/kg (McCready *et al.*, 2006) y la presa Aguamilpa en Nayarit (Zambrano *et al.*, 2004) cuyas concentraciones alcanzaron los 30 400 y 25 000 mg/kg en época de estiaje y lluvias respectivamente.

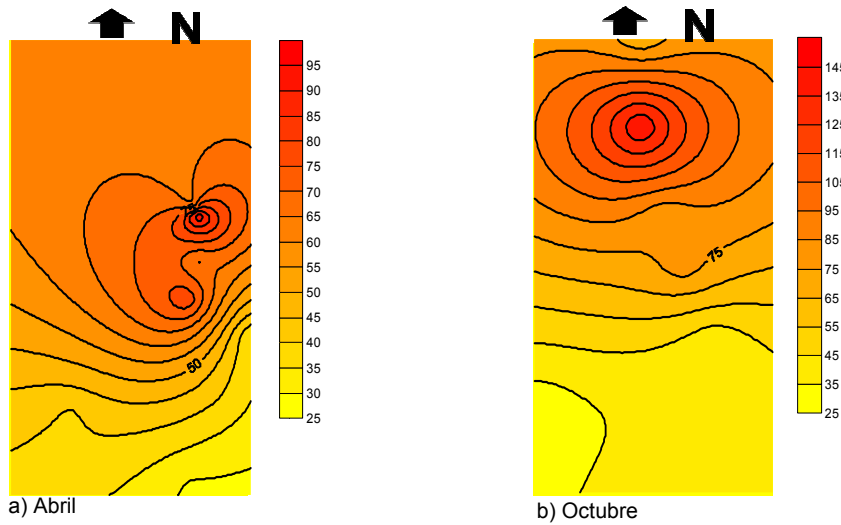


Figura 5.39 Mapa de contorno de la concentración de plomo en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.40 se observan los gradientes de concentración de antimonio en abril y octubre y se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en abril y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina).

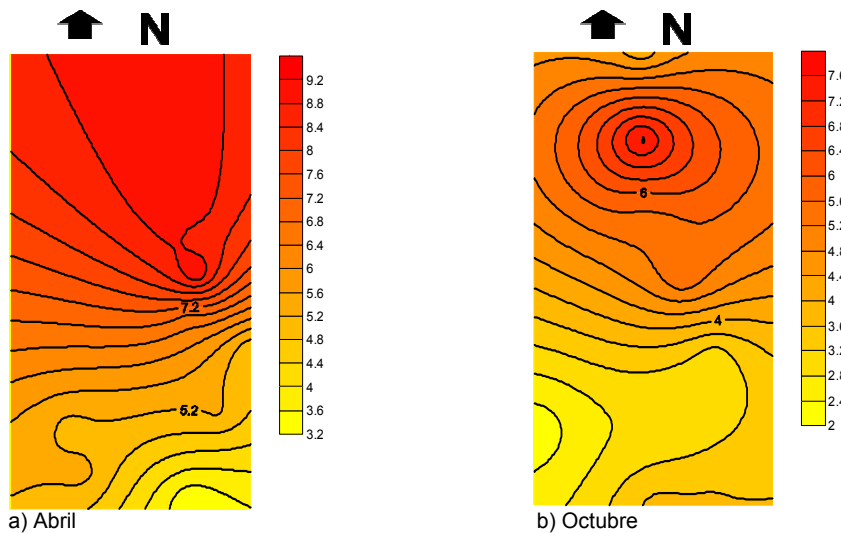


Figura 5.40 Mapa de contorno de la concentración de antimonio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.41 se observan las diferencias entre los gradientes de concentración de selenio en abril y octubre. En abril las concentraciones mayores se encontraron en la parte suroeste de la presa mientras que en octubre aunque

hay una concentración grande en la zona sur, las concentraciones mayores fueron encontradas en la parte norte. Es escasa la información de selenio en sedimentos pero los valores máximos en La Purísima superan la concentración máxima (0.540 mg/kg) encontrada en esta misma presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) y los valores reportados para el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) donde se encontraron valores máximos de 1 mg/kg.

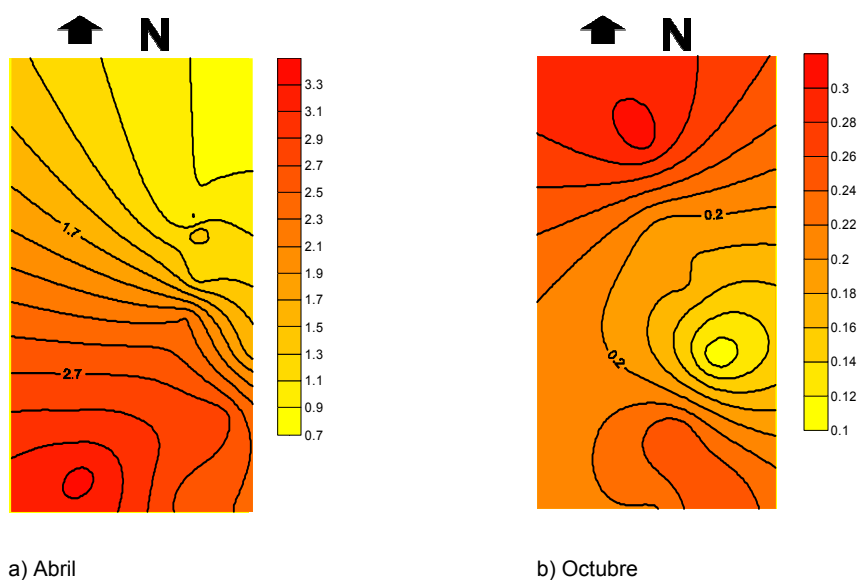


Figura 5.41 Mapa de contorno de la concentración de selenio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.42 se observan los gradientes de concentración de uranio en abril y octubre y se aprecia, a diferencia de los anteriores metales descritos, que las mayores concentraciones se encuentran en la parte sur de la presa (hacia la cortina) y disminuyen conforme se acerca a la entrada del río.

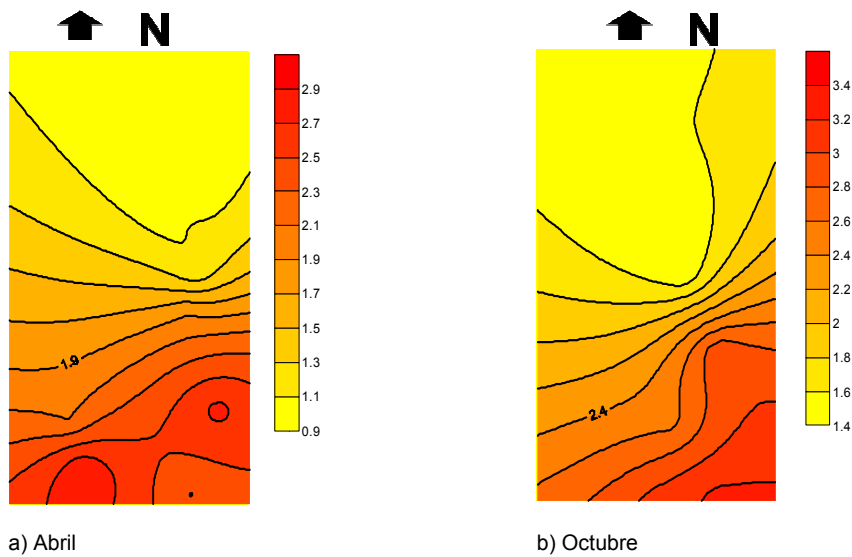


Figura 5.42 Mapa de contorno de la concentración de uranio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.43 se observan los gradientes de concentración de vanadio en abril y octubre y se aprecian las mayores concentraciones en la entrada del río, especialmente en octubre y su disminución conforme se avanza hacia la parte sur de la presa (hacia la cortina).

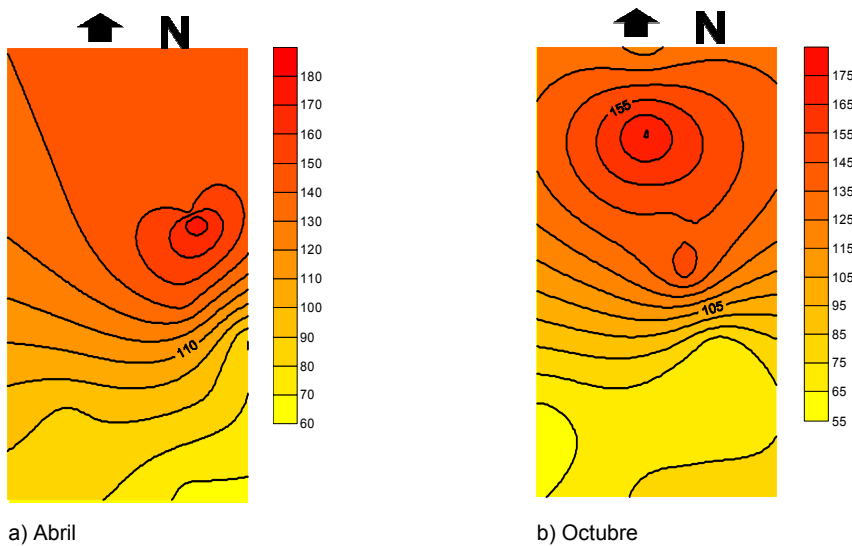


Figura 5.43 Mapa de contorno de la concentración de vanadio en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En la Figura 5.44 se observa la diferencia entre los gradientes de concentración de zinc en abril y octubre. En abril se aprecian las concentraciones mayores en la parte central y en octubre en la parte norte de la presa. El valor máximo de zinc en La Purísima es mayor que la concentración máxima (35 mg/kg) encontrada en esta misma presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato) y que el valor encontrado en la presa Umtata en la provincia de Eastern Cape en Sudáfrica (Fatoki & Awofolu, 2003) donde la concentración máxima fue de 0.052 mg/kg; la costa de Sonora donde la concentración máxima fue de 34.32 mg/kg (Domínguez *et al.*, 2004); la Gran Barrera de Arrecifes en Australia (Haynes & Johnson, 2000) donde la concentración máxima fue de 40 mg/kg; la laguna Joyuna en Puerto Rico donde se encontraron concentraciones máximas de 65 mg/kg (Acevedo *et. al*, 2006); el río de Coatzacoalcos con concentraciones máximas de 109.2 mg/kg (Bahena & Rosales, 2002); los ríos Buyak Menderes y Gediz en Turquía (Ackay *et al.*, 2003) con concentraciones máximas de 181 y 158 mg/kg respectivamente. Por el contrario, estos niveles son menores a los encontrados en la presa Alzate en el Estado de México (Avila *et al.*, 1997; Barceló *et al.*, 2002) donde se reportaron valores máximos de 319 mg/kg; el río Columbia, en Estados Unidos (Delistraty & Yokel, 2007) con concentraciones máximas de 540 mg/kg; la presa Wadi Al-Arab en Jordania (Ghrefat & Yusuf, 2006) donde se encontraron valores máximos de 960 mg/kg; la laguna de San José en Puerto Rico (Acevedo *et. al*, 2006) con niveles máximos de 1 530 mg/kg; el puerto de Sydney en Australia donde se encontraron concentraciones máximas de 11 300 mg/kg (McCready *et al.*, 2006).



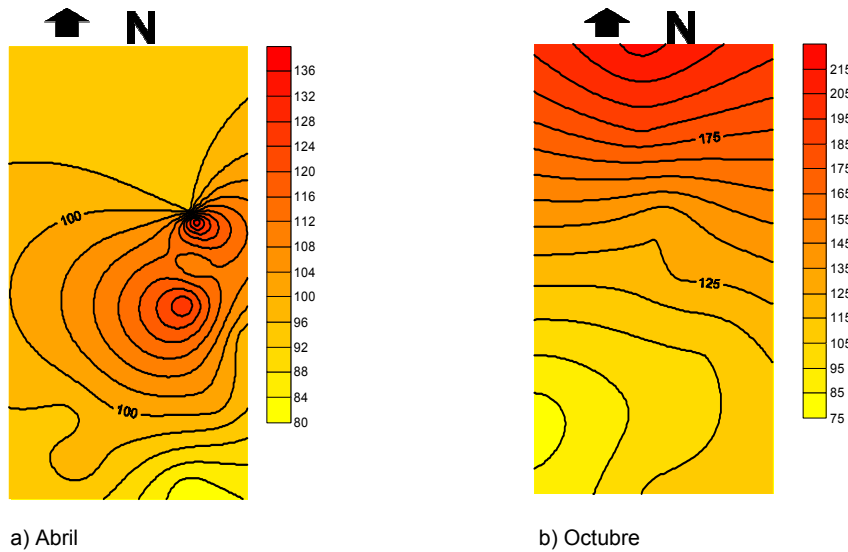


Figura 5.44 Mapa de contorno de la concentración de zinc en las muestras de sedimento de la presa La Purísima en a) abril y b) octubre

En los Cuadros A.4 y A.5 del apéndice se resumen los coeficientes de correlación de Pearson para los metales en las muestras de sedimento en la presa La Purísima en el mes de abril y octubre respectivamente. En ambos cuadros se observa la presencia de correlaciones positivas por lo cual se realizó el análisis de componentes principales para cada uno de los muestreos.

En el Cuadro 5.9 se resumen los componentes principales para la concentración de metales en sedimento en el mes de abril donde se observa que se obtuvieron cuatro componentes principales que acumulan el 98.04 % del total de la varianza. El componente 1 está dominado por cromo y vanadio y representan el 75.73 % del total de la varianza. El componente 2 explica el 11.74 % de la varianza total y está dominado por cadmio, selenio, uranio y zinc. El componente 3 está dominado por arsénico y mercurio y representa el 6.56% del total de la varianza. En este componente se aprecia también que el litio está correlacionado negativamente con el arsénico y el mercurio. Finalmente, el componente 4 está dominado por mercurio, litio, selenio y uranio explicando el 4.00 % del total de la varianza.

Cuadro 5.9 Matriz de componentes principales para los datos de metales en sedimento de la presa La Purísima en abril.

<i>Elemento</i>	<i>Componente</i>			
	1	2	3	4
Ag	0.29	-0.13	-0.04	0.00
As	0.18	0.23	0.70	-0.28
Cd	0.21	0.50	-0.04	-0.10
Cr	0.30	-0.05	-0.06	-0.01
Cu	0.29	0.08	0.00	-0.08
Fe	0.29	0.09	-0.11	0.20
Hg	0.18	-0.29	0.58	0.50
Li	0.24	0.08	-0.30	0.61
Ni	0.29	0.06	0.01	-0.07
Pb	0.29	0.11	-0.09	-0.06
Sb	0.27	-0.25	0.07	0.09
Se	-0.20	0.46	0.21	0.31
U	-0.24	0.35	0.06	0.35
V	0.30	-0.06	0.00	-0.02
Zn	0.25	0.40	-0.10	-0.09
Eigenvalores	11.36	1.76	0.98	0.60
Porcentaje de varianza	75.73	11.74	6.56	4.00
Porcentaje acumulativo	75.73	87.47	94.04	98.04

También se realizó un análisis de clusters donde se aprecia la cercanía entre los metales. Este análisis generó seis clusters (Figura 5.45): 1) Ag – Fe; 2) As – Cd; 3) Se – U; 4) Hg – Ni; 5) Cu – Pb; y 6) V - Zn. Siendo el selenio con el uranio los más unidos.

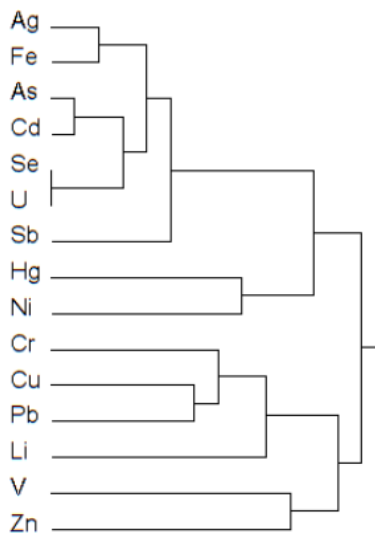


Figura 5.45. Dendrograma obtenido por el método de cluster para los quince metales en sedimento de la presa La Purísima durante el primer muestreo (abril).

En el (Cuadro 5.10) se resumen los componentes principales para la concentración de metales en sedimento en el mes de octubre donde se observa que se obtuvieron cuatro componentes principales que acumulan el 97.94 % del total de la varianza. El componente 1 está dominado por la mayoría de los elementos: plata, cadmio, cromo, cobre, hierro, mercurio, litio, níquel, plomo, antimonio, vanadio y zinc y representan el 78.95% del total de la varianza. También se observa una correlación negativa entre los elementos anteriores y el uranio. El componente 2 explica el 8.79 % de la varianza total y está dominado por selenio y uranio. El componente 3 está dominado por hierro y representa el 7.15 % del total de la varianza. En este componente se aprecia también que el hierro está correlacionado de manera negativa con el selenio y el zinc. Finalmente, el componente 4 está dominado por mercurio y selenio explicando el 3.06 % del total de la variancia y presentando ambos metales una correlación negativa con el zinc.

Cuadro 5.10 Matriz de componentes principales para los datos de metales en sedimento de la presa La Purísima en octubre.

<i>Elemento</i>	<i>Componente</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Ag	0.29	-0.04	0.11	0.03
As	0.04	0.77	0.37	-0.23
Cd	0.28	0.13	-0.20	-0.22
Cr	0.28	-0.11	0.06	-0.11
Cu	0.29	-0.04	-0.11	-0.08
Fe	0.28	0.06	0.21	0.14
Hg	0.27	-0.07	0.10	0.33
Li	0.28	0.00	0.14	-0.14
Ni	0.29	-0.04	0.02	0.00
Pb	0.28	0.06	0.06	0.26
Sb	0.28	0.09	0.19	0.20
Se	0.12	0.40	-0.69	0.49
U	-0.24	0.42	0.14	0.15
V	0.29	-0.07	0.10	0.04
Zn	0.23	0.13	-0.42	-0.60
Eigenvalores	11.84	1.32	1.07	0.46
Porcentaje de varianza	78.95	8.79	7.15	3.06
Porcentaje acumulativo	78.95	87.73	94.88	97.94

En la Figura 5.46 se observan cuatro clusters generados para los metales en agua en el segundo muestreo (octubre): Este análisis generó cinco clusters

(Figura 5.46): 1) Fe – Sb; 2) Cd - Se; 3) Hg – Ni; 4) Cr - Pb; y 5) V - Zn. Siendo el cadmio con selenio los más unidos. Los cluster Hg - Ni y V - Zn lo cual podría indicar que el comportamiento de estos metales es el mismo en ambas temporadas.

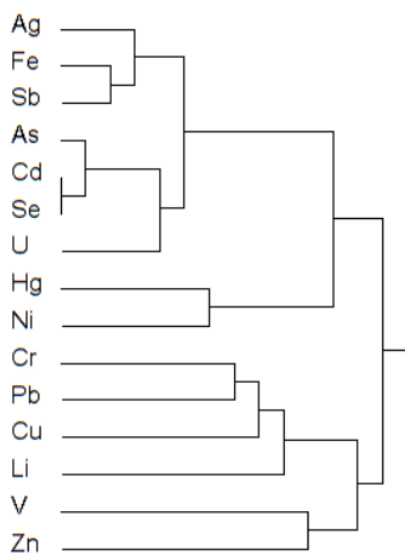


Figura 5.46. Dendrograma obtenido por el método de cluster para los quince metales en sedimento de la presa La Purísima durante el segundo muestreo (octubre).

### Identificación de peces en la presa

En la presa La Purísima se identificaron diferentes especies de peces que se describen a continuación.

Se identificaron peces pertenecientes a la familia Goodeidae que está constituida por peces vivíparos, exclusivamente mexicanos (figura 5.47a). Esta familia se caracteriza debido a que la aleta anal de los machos se encuentra modificada para las funciones de fecundación, ya que los primeros seis o siete radios son de menor longitud que los demás de la misma aleta y actúan como órgano conductor del esperma (Álvarez, 1970). Los peces pertenecen específicamente al género *Goodea Jordan* que es el género típico de la familia y la especie (o subespecie) es *G. atripinnis*, esta subespecie típica vive en los tributarios del río Lerma en el bajío (Álvarez, 1970).

La otra especie de Goodeido que se identificó en la Presa La Purísima fue *Xenotoca variata* (figura 6.47b). Esta es una especie insectívora endémica de México.

Adicionalmente se identificaron charales (*Chirostoma sp.*) y tilapias (*Oreochromis sp.*) que son introducidas para su cultivo en la presa (figura 6.47c y 6.47d respectivamente).



a)



b)



c)



d)

Figura 5.47. Fotografías de peces identificados en la presa La Purísima: a) *G. atripinnis*, b) *X. variata*, c) *Chirostoma sp.* y d) *Oreochromis sp.*

## Evaluación de biomarcadores en peces

La evaluación de biomarcadores en peces se efectuó en peces *Goodea atripinnis* obtenidos de Texcoco debido a que la aclimatación de los peces provenientes de la presa La Purísima no fue posible ya que los peces recolectados no sobrevivieron, probablemente debido a la presencia de parásitos (que se observaron durante la disección de dichos peces) que disminuyeron sus defensas y su adaptación a los cambios de condiciones ambientales.

Los niveles promedio de lipoperoxidación hallados en las branquias de *G. atripinnis* se encontraron en un intervalo de 684.9 a 1029.4 nmoles/mg de proteína en los diferentes puntos de la presa. En hígado y músculo estos niveles fueron menores y se encontraron en un intervalo de 357.9 a 432.8 nmoles/mg de proteína y de 328.0 a 401.6 nmoles/mg de proteína respectivamente (cuadro 5.11). Este comportamiento es explicable considerando que las branquias son el primer punto de contacto con el medio y por lo tanto, con los contaminantes que ocasionan la lipoperoxidación.

En el cuadro 5.11 se observa que los peces expuestos al agua recolectada en el punto 1 (más cercano a la cortina) presentan una mayor lipoperoxidación en branquias en comparación con el resto de los puntos y el control.

Los valores de lipoperoxidación en músculo de *Goodea atripinnis* no parecen afectados por la exposición al agua de la presa, a excepción de los valores presentados para el punto 2 que son ligeramente mayores al control (cuadro 5.11).

Para el caso de los valores de lipoperoxidación en hígado, los valores del control superan los valores presentados por los tres puntos de la presa.

Los valores de lipoperoxidación en los tres tejidos (branquias, músculo e hígado) encontrados en el control y en los tres puntos evaluados de la presa La Purísima, superan los valores reportados para esta misma especie (*G. atripinnis*) en el río Ameca (Tejeda *et al.*, 2007) lo cual podría ser indicativo de que los peces sí se encontraron sometidos a un estrés al estar en contacto con el agua de la presa y del agua que fue utilizada como control.

Cuadro 5.11 Lipoperoxidación (nmoles/mg de proteína) en tejidos de *Goodea atripinnis* en el control y en los tres diferentes puntos de muestreo de la presa La Purísima (promedio  $\pm$  desviación estándar).

<i>Tejido</i>	<i>Puntos de muestreo</i>			
	Control	1	2	3
Branquias	612 $\pm$ 81	1029 $\pm$ 417	685 $\pm$ 106	713 $\pm$ 181
Músculo	337 $\pm$ 8	328 $\pm$ 35	402 $\pm$ 126	339 $\pm$ 58.
Hígado	955 $\pm$ 952	376 $\pm$ 35	358 $\pm$ 298	433 $\pm$ 32

Por otra parte, la actividad de la acetilcolinesterasa fue menor en músculo con respecto a branquias, presentado un intervalo de concentraciones promedio de 1.26 a 1.55  $\mu\text{mol/mg/min}^{-1}$  y de 4.57 a 5.26  $\mu\text{mol/mg/min}^{-1}$  respectivamente (cuadro 5.12).

Los valores de actividad de acetilcolinesterasa en branquias disminuyen del punto 1 al 3 (de la cortina de la presa hacia la entrada del río) indicando posiblemente un efecto por plaguicidas organofosforados o carbamatos principalmente proveniente del río. También se observa un valor menor de la actividad de acetilcolinesterasa en músculo en el punto 3, lo cual fortalece la sospecha de una mayor afectación en la zona aledaña a la entrada del río.

Los valores de la actividad de la acetilcolinesterasa encontrados en la Presa, son mayores a los encontrados en el río Ameca (Tejeda *et al.*, 2007) lo cual hace pensar que no hay presencia de afectaciones en la presa La Purísima ocasionadas por plaguicidas organofosforados o carbamatos.

Cuadro 5.12 Actividad de la acetilcolinesterasa ( $\mu\text{mol/mg/min}^{-1}$ ) en branquias y músculo de *Goodea atripinnis* en el control y en los tres diferentes puntos de muestreo de la presa La Purísima (promedio  $\pm$  desviación estándar).

<i>Tejido</i>	<i>Puntos de muestreo</i>			
	Control	1	2	3
Branquias	3.84 $\pm$ 0.31	5.26 $\pm$ 1.47	4.68 $\pm$ 0.72	4.57 $\pm$ 1.00
Músculo	1.51 $\pm$ 0.02	1.40 $\pm$ 0.14	1.55 $\pm$ .43	1.26 $\pm$ 0.11

## **Caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua-índice de calidad del agua (ICA)**

El índice de calidad del agua (ICA) de la presa La Purísima fue evaluado de acuerdo a Dinius (1987) considerando el agua en los mismos puntos utilizados en la evaluación de los biomarcadores en peces ilustrados en la figura 4.3 siendo el punto 1 el más cercano a la cortina de la presa y el punto 3 el más cercano a la entrada del río.

De acuerdo al cuadro 5.13 se observa que el ICA va disminuyendo de la cortina hacia la entrada del río, lo cual podría indicar que el río Guanajuato es la fuente principal del deterioro de la calidad del agua de la presa. Así mismo, considerando que en la cortina se alcanza la mayor profundidad de la presa, podría ser esta zona donde se diluyen los contaminantes.

Por otra parte, en base al índice multiplicativo aplicado (Dinius, 1987) se obtuvo un ICA para el punto 1 de 93.69 (cuadro 5.13) que indica que el agua no requiere purificación para su consumo o para riego (si su uso es como agua potable o en agricultura respectivamente) y que es aceptable para su uso en recreación y acuicultura. El ICA del punto 2 es de 82.85, indicativo de que solo requiere purificación menor para su consumo o para cultivos que requieran de alta calidad de agua (si su uso es como agua potable o en agricultura respectivamente) y que es aceptable para su uso en recreación y acuicultura (Dinius, 1987). El ICA del punto 3 es de 76.32, indicativo de que se requiere un tratamiento más extensivo para su consumo (si su uso es como agua potable) pero solo requiere purificación menor para cultivos que requieran de alta calidad de agua (si se usa en la agricultura) y que es aceptable para su uso en recreación y acuicultura.



Cuadro 5.13 Índice de Calidad del Agua en la presa La Purísima

<i>Puntos de muestreo</i>	<i>ICA</i>
1	93.69
2	82.85
3	76.32

De acuerdo al cuadro 5.13, la calidad del agua es aceptable en la presa La purísima y no se encontró una relación con los biomarcadores analizados.

### **Análisis de metales en tejidos de peces**

A continuación se describen las concentraciones de metales encontrados en los diferentes tejidos analizados de tilapia (*Oreochromis sp.*): músculo, hueso, hígado, branquias y vísceras. Se incluye además una comparación con normatividad y otros estudios realizados aunque, debido a la escasa información sobre el tema, dichas comparaciones son escuetas e incluyen peces de diferentes especies.

### **Metales en músculo**

Con excepción de la plata, todos los metales analizados fueron encontrados en músculo de tilapia (*Oreochromis sp.*) en casi la totalidad de los puntos de muestreo (Cuadro 5.14). El cadmio y el cromo fueron detectados únicamente en un punto de muestreo (punto 1 en ambos casos). El zinc fue el metal encontrado en mayor concentración en músculo (27.9 mg/kg en promedio). Las concentraciones promedio, por metal, se encontraron en el siguiente orden descendente: Zn > Fe > Se > As > Li > Cu > Pb > Ni > V > Cr > Sb > Cd > Ag.

La concentración máxima de cadmio en el músculo de tilapias de la presa (0.003 mg/kg) se encuentra por debajo de los límites máximos permisibles (0.5 mg/kg) que establece la NOM-027-SSA1-1993 para pescado fresco-refrigerado y congelado pero la concentración máxima de plomo (1.3 mg/kg) encontrada en tilapia, sí rebasa el límite máximo permisible por la normatividad mexicana (1

mg/kg). Es importante resaltar que el resto de los metales no se encuentra regulado, en peces, por la normatividad mexicana.

Como se mencionó anteriormente, la plata no fue detectada en el músculo de tilapia de la presa La Purísima, resultado que coincide con el estudio en tilapia (*Oreochromis aureus*) realizado en esta presa en el 2005 (Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato-SDA)

**Cuadro 5.14 Concentraciones de metales en músculo de peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima\***

Elemento	Puntos de muestreo							Concentración máxima	Concentración mínima	Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7				
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0
As	2.8	2.6	2.1	1.7	1.3	1.7	1.5	2.8	1.3	2.0	0.6
Cd	ND	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	ND	0.001	0.001
Cr	ND	0.02	0.04	0.02	0.06	0.13	0.16	0.16	ND	0.06	0.06
Cu	0.7	0.6	0.6	0.8	0.6	0.7	1.1	1.1	0.6	0.7	0.2
Fe	9.6	8.2	13.7	15.8	10.5	9.1	25.3	25.3	8.2	13.2	6.0
Li	1.6	1.9	2.3	2.1	2.3	2.0	1.5	2.3	1.5	1.9	0.3
Ni	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.13	0.16	0.16	0.03	0.07	0.05
Pb	1.3	0.8	0.3	0.7	0.4	0.4	0.3	1.3	0.3	0.6	0.4
Sb	0.035	0.051	0.016	0.001	0.035	0.078	0.082	0.082	0.001	0.042	0.030
Se	5.0	5.1	6.5	5.7	7.0	4.6	6.2	7.0	4.6	5.7	0.9
V	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05	0.13	0.18	0.18	0.01	0.07	0.06
Zn	29.8	28.8	28.4	37.9	24.3	20.2	26.2	37.9	20.2	27.9	5.5

\*Concentraciones en mg/kg; ND: No detectado; NA: No aplica

La concentración máxima de arsénico en músculo de tilapia de la presa La Purísima en este estudio es de 2.8 mg/kg (Cuadro 5.15) y es mayor a la concentración máxima encontrada en músculo de tilapia (*Oreochromis aureus*) en esta misma presa durante un estudio realizado en el 2005 (SDA). Pero es menor a la reportada en carpa (*Cyprinus carpio*) en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo con concentraciones máximas de 9 mg/kg (Bustos *et al.*, 2006) y en peces mero punteado naranja y emperador relámpago del Golfo de Omán con concentraciones de 14.4 mg/kg y 10.0 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima encontrada de cadmio en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.003 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es similar a la reportada en caballa, platija y bacalao de puertos de Dublín, Irlanda con concentraciones máximas de cadmio de 0.002 mg/kg (Rowe *et al.*, 1998) y es menor a las concentraciones máximas de 0.25 mg/kg reportadas en pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía (Tuzen, *et al.*, 2007) y de peces mero punteado naranja y peces emperador relámpago del Golfo de Omán donde se encontraron concentraciones máximas de 0.013 mg/kg y 0.014 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

Cuadro 5.15 Concentraciones de metales en músculo de diferentes especies

Sitio de estudio	Organismo	Niveles de metal encontrados (mg/kg)									
		As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Se	V	Zn
Presa La Purísima <sup>1</sup>	Tilapia ( <i>Oreochromis sp.</i> )	2.8 *	0.003 *	0.16 *	1.1 *	25.3 *	0.16 *	1.3 *	7.0 *	0.18 *	37.9 *
Presa La Purísima <sup>2</sup>	Tilapia ( <i>Oreochromis aureus</i> )	0.156 *		< 0.10				< 0.10	< 10.997		113.94 *
Laguna de Tecocomulco, Hgo. <sup>3</sup>	Carpa ( <i>Cyprinus carpio</i> )	9 *		< 0.05				< 0.05			26
Golfo de Omán <sup>4</sup>	Peces mero punteado naranja ( <i>Epinephelus coioides</i> )	14.4 *	0.013 *	0.075 *	19.5 *	25.1 *	0.09 *	0.551 *	3.27 *	0.04 *	67.3 *
Golfo de Omán <sup>4</sup>	Peces emperador relámpago ( <i>Lethrinus nebulosus</i> )	10.0 *	0.014 *	0.077 *	0.88 *	203 *	0.111 *	0.119 *	4.68 *	0.04 *	11.1 *
Puertos de Dublín, Irlanda <sup>5</sup>	Caballa, platija y bacalao		0.002 *	0.13 *	0.41			0.046 *			3.9 *
Turquía <sup>6</sup>	Pescados enlatados (anchovas, atunes, sardinas y jurel)		0.25	1.70 *	2.50 *	30.3 *	0.85 *	0.40 *	3.64 *		34.4 *
Distrito minero de Tri-state, Oklahoma <sup>7</sup>	Lobina negra							< 0.25			11
Distrito minero de Tri-state, Oklahoma <sup>7</sup>	Mojarra de agallas azules ( <i>Lepomis macrochirus</i> )							< 0.25			8.3
Distrito minero de Tri-state, Oklahoma <sup>7</sup>	Carpa							0.28			16
Lago Honduras <sup>8</sup>	Lobina negra ( <i>Micropterus salmoides</i> )							0.586 **			
Lago Honduras <sup>8</sup>	Tilapia ( <i>tilapia sp.</i> )							0.423 **			

Fuente: <sup>1</sup>Estudio presente; <sup>2</sup>SDA, 2005; <sup>3</sup>Bustos et al., 2006; <sup>4</sup>Mora, et al., 2004; <sup>5</sup>Rowe et al., 1998; <sup>6</sup>Tuzen, et al., 2007; <sup>7</sup>DEQ, 2003; <sup>8</sup>CESCCO & EPLF, 1994.

\*Concentración máxima; \*\*Concentración promedio

La concentración máxima de cromo encontrada en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.16 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es mayor a las encontradas en tilapia (*Oreochromis aureus*) en esta presa en el 2005 (SDA) cuando las concentraciones de cromo no fueron detectadas (<0.10 mg/kg); en carpa (*Cyprinus carpio*) donde proveniente de la laguna de Tecocomulco en Hidalgo (Bustos *et al.*, 2006) se reportaron concentraciones por debajo del límite de detección (<0.05 mg/kg); en peces mero punteado naranja y peces emperador relámpago del Golfo de Omán las concentraciones máximas correspondieron a 0.075 mg/kg y 0 0.077 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004); estudios realizados en Dublín, en caballa, platija y bacalao encontraron concentraciones de 0.1 mg/kg (Rowe *et al.*, 1998). Por el contrario, las concentraciones máximas de cromo en el músculo de tilapia de la presa fueron menores que las reportadas en pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía con concentraciones máximas de 1.70 mg/kg (Tuzen, *et al.*, 2007).

La concentración máxima de cobre en músculo de tilapia de la presa La Purísima es de 1.1 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es mayor a la concentración reportada en músculos de peces emperador relámpago (del Golfo de Omán (De Mora, *et al.*, 2004) con concentraciones máximas de 0.88 mg/kg; a las concentraciones en caballa, platija y bacalao en puertos de Dublín de 0.41 mg/kg (Rowe *et al.*, 1998) pero es menor a las concentraciones reportadas para peces mero punteado naranja del Golfo de Omán con concentraciones máximas de 19.5 mg/kg (De Mora, *et al.*, 2004) y que los valores reportados en pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía con concentraciones máximas de 2.50 mg/kg (Tuzen *et al.*, 2007).

La concentración máxima de hierro en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 25.3 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es similar a las concentraciones reportadas en peces mero punteado naranja del Golfo de Omán (De Mora, *et al.*, 2004) donde se encontraron concentraciones máximas 25.1 mg/kg y es menor que las concentraciones reportadas para pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía (Tuzen, *et al.*, 2007) donde se encontraron concentraciones máximas de 30.3 mg/kg y las reportadas en peces

emperador relámpago del Golfo de Omán (De Mora, *et al.*, 2004) con concentraciones máximas de 203 mg/kg.

La concentración máxima encontrada de níquel en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.16 mg/kg (Cuadro 5.15) y es mayor a las concentraciones reportadas en peces mero punteado naranja y peces emperador relámpago del Golfo de Omán (De Mora, *et al.*, 2004) donde se encontraron concentraciones máximas de 0.09 mg/kg y 0.111 mg/kg respectivamente y es menor que las concentraciones reportadas para pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía (Tuzen, *et al.*, 2007) donde se encontraron concentraciones máximas de 0.85 mg/kg.

La concentración máxima de plomo en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 1.3 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es mayor a las reportadas en esta presa en el año 2005 (SDA) en músculo de tilapia (*Oreochromis aureus*) donde el plomo no fue detectado (<0.10 mg/kg); en el lago de Yojoa en Honduras en músculos de especies de lobina negra (*Micropterus salmoides*) y tilapia (*tilapia sp.*) donde encontraron concentraciones promedio de 0.586 y 0.423 mg/kg respectivamente (CESCCO & EPLF, 1994); en el Golfo de Omán donde se encontraron concentraciones máximas de 0.551 mg/kg y 0.119 mg/kg en peces mero punteado naranja y emperador relámpago respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004); en Turquía donde se encontraron concentraciones máximas de 0.40 mg/kg en pescados enlatados como las anchoas, atunes, sardinas y jurel (Tuzen *et al.*, 2007); en Oklahoma en el distrito minero de Tri-state donde las concentraciones de plomo reportadas presentan valores de 0.28 mg/kg en carpa y por debajo de los límites de detección (<0.25 mg/kg) en mojarra de agallas azules (*Lepomis macrochirus*) y lobina negra (DEQ, 2003); en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo tampoco fue detectado (<0.05 mg/kg) el plomo en músculo de carpa (*Cyprinus carpio*) (Bustos *et al.*, 2006); y en puertos en Dublín, Irlanda, donde se encontraron concentraciones máximas de 0.046 mg/kg en caballa, platija y bacalao (Rowe *et al.*, 1998).

La concentración máxima de selenio en músculo de tilapia de la presa La Purísima corresponde a 7.0 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es mayor

que la reportada en pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) en Turquía (Tuzen, *et al.*, 2007) donde se encontraron concentraciones máximas de 3.64 mg/kg y que las concentraciones reportadas en peces mero punteado naranja y emperador relámpago del Golfo de Omán (De Mora, *et al.*, 2004) con concentraciones máximas de 3.27 mg/kg y 4.68 mg/kg respectivamente y es menor a la concentración máxima encontrada en esta presa durante un estudio realizado en el 2005 (SDA) donde se reportó una concentración de 10.997 mg/kg en músculo de tilapia (*Oreochromis aureus*).

La concentración máxima de vanadio en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.18 mg/kg (Cuadro 5.15), valor mayor a las concentraciones reportadas en peces mero punteado naranja y peces emperador relámpago del Golfo de Omán (De Mora *et al.*, 2004) donde se encontraron concentraciones máximas de 0.04 mg/kg para ambas especies.

La concentración máxima de zinc en músculo de tilapia de la presa La Purísima fue de 37.9 mg/kg (Cuadro 5.15). Esta concentración es mayor a la reportada en puertos de Dublín, Irlanda, donde se encontraron concentraciones máximas de 3.9 mg/kg en caballa, platija y bacalao (Rowe *et al.*, 1998), en Oklahoma en el distrito minero de Tri-state donde las concentraciones de zinc fueron de 11 mg/kg en lobina negra, de 16 mg/kg en carpa y de 8.3 mg/kg en la mojarra de agallas azules (DEQ, 2003); en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo con concentraciones de 26 mg/kg en carpa (*Cyprinus carpio*) (Bustos *et al.*, 2006); en el Golfo de Omán con concentraciones máximas de 11.1 mg/kg en peces emperador relámpago (De Mora, *et al.*, 2004) y en Turquía en pescados enlatados (anchoas, atunes, sardinas y jurel) donde se encontraron concentraciones máximas de zinc de 34.4 mg/kg (Tuzen, *et al.*, 2007).; pero es menor a la concentración máxima encontrada en esta presa en el 2005 (SDA) cuando la concentración correspondió a 113.94 mg/kg en músculo de tilapia (*Oreochromis aureus*); en el Golfo de Omán con concentraciones máximas de 67.3 mg/kg en peces mero punteado naranja (De Mora, *et al.*, 2004).



## Metales en hueso

Con excepción del cromo, el cual fue solamente encontrado en el punto 6, todos los metales analizados fueron detectados en hueso de tilapia (Cuadro 5.16). El litio fue el metal que se encontró en mayor concentración (82.7 mg/kg en promedio) y el cromo el que se encontró en menor concentración (0.001 mg/kg en promedio). Las concentraciones promedio de los metales analizados se encontraron en el siguiente orden descendente: Li > Zn > Fe > As > V > Ag > Se > Pb > Cu > Sb > Ni > Cd > Cr.

Las concentraciones de arsénico, cadmio, cromo y plomo en hueso de tilapia en La Purísima (Cuadro 5.16) fueron mayores a las concentraciones encontradas en hueso de carpa (*Cyprinus carpio*) en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo donde estos metales se encontraron por debajo de los límites de detección (Bustos *et al.*, 2006). Por el contrario, las concentraciones de zinc en hueso de tilapias en La Purísima (Cuadro 5.16) fueron menores que los 177 mg/kg reportados para carpas en la laguna de Tecocomulco (Bustos *et al.*, 2006).

Cuadro 5.16 Concentraciones de metales en hueso de peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima\*

Elemento	Puntos de muestreo							Concentración máxima	Concentración mínima	Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7				
Ag	0.8	1.1	1.2	1.5	1.3	1.2	1.2	1.5	0.8	1.2	0.2
As	3.1	3.0	1.5	2.5	1.0	3.1	2.1	3.1	1.0	2.3	0.8
Cd	0.028	0.023	0.026	0.028	0.028	0.024	0.027	0.028	0.023	0.026	0.002
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	0.004	ND	0.004	ND	0.001	0.002
Cu	0.36	0.39	0.36	0.47	0.48	0.40	0.46	0.48	0.36	0.42	0.05
Fe	11.0	11.3	8.3	8.7	18.8	19.4	24.9	25.0	8.3	14.6	6.4
Li	79.7	90.6	87.7	79.2	82.1	85.5	74.5	90.6	74.5	82.7	5.5
Ni	0.023	0.031	0.048	0.039	0.049	0.034	0.066	0.066	0.023	0.041	0.014
Pb	1.0	1.1	1.2	1.0	0.9	0.8	0.8	1.2	0.8	1.0	0.1
Sb	0.40	0.28	0.30	0.47	0.31	0.42	0.37	0.47	0.28	0.36	0.07
Se	1.0	1.1	1.4	1.1	1.3	1.0	1.3	1.4	1.0	1.2	0.2
V	1.1	1.4	2.3	2.1	2.0	1.6	1.7	2.3	1.1	1.7	0.4
Zn	47.7	43.2	54.5	43.2	40.9	38.8	43.1	54.5	38.8	44.5	5.2

\*Concentraciones en mg/kg; ND: No detectado

## **Metales en hígado**

Todos los metales analizados fueron encontrados en hígado (Cuadro 5.17), a excepción del cromo que no fue detectado solo en dos puntos de muestreo (punto 1 y 2) y el antimonio en tres puntos (puntos 1, 2 y 7). El hierro fue el metal encontrado en mayores concentraciones (1 788.9 mg/kg en promedio) y el cadmio se encontró presente en una menor concentración (0.07 mg/kg en promedio). Las concentraciones promedio se encuentran en el siguiente orden descendente: Fe > Zn > Cu > Se > Li > As > Pb > V > Ag > Cr > Ni > Sb > Cd.

Cuadro 5.17 Concentraciones de metales en hígado de peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima\*

Elemento	Puntos de muestreo							Concentración máxima	Concentración mínima	Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7				
Ag	0.3	1.8	7.8	2.2	4.5	0.8	5.2	7.8	0.3	3.2	2.7
As	8.7	6.9	7.0	12.1	8.9	9.2	10.3	12.1	6.9	9.0	1.8
Cd	0.03	0.07	0.07	0.10	0.13	0.02	0.08	0.13	0.02	0.07	0.04
Cr	ND	ND	1.16	6.82	6.08	0.03	0.84	6.82	ND	2.13	2.99
Cu	28.8	45.5	95.0	70.8	85.9	21.9	100.3	100.3	21.9	64.0	32.0
Fe	600.6	651.7	1367.0	3987.7	3964.3	350.5	1600.8	3987.7	350.5	1788.9	1557.5
Li	1.3	1.7	6.3	20.2	21.1	5.8	8.9	21.1	1.3	9.3	8.2
Ni	0.8	0.7	1.2	4.1	3.6	0.3	1.1	4.1	0.3	1.7	1.5
Pb	2.0	3.0	4.6	8.9	8.6	2.9	1.7	8.9	1.7	4.6	3.0
Sb	ND	ND	0.660	0.009	0.022	0.536	ND	0.660	ND	0.175	0.291
Se	8.2	8.9	14.3	10.7	14.4	8.7	16.8	16.8	8.2	11.7	3.4
V	0.7	1.1	3.2	10.7	10.2	0.5	4.9	10.7	0.5	4.5	4.4
Zn	206.6	270.3	197.8	235.4	186.6	154.0	176.2	270.3	154.0	203.8	38.7

\*Concentraciones en mg/kg; ND: No detectado

La concentración máxima de plata en hígado de tilapias en La Purísima fue de 7.8 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que supera las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja (*Epinephelus coioides*) y en peces emperador relámpago (*Lethrinus nebulosus*) con concentraciones máximas de 1.29 mg/kg y de 0.675 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de arsénico en hígado de tilapias en La Purísima fue de 12.1 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que es inferior a las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 3 mg/kg y de 22.4 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de cadmio en hígado de tilapias en La Purísima fue de 0.13 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que se encuentra muy por debajo de las concentraciones máximas reportadas en áreas mineras de Missouri, E.U, en hígado de peces rodapiedras (*Campostoma oligolepis*) y en mojarra del sol (*Lepomis megalotis*) con concentraciones máximas de 11.7 mg/kg y 30.6 mg/kg respectivamente (Schmitt *et al.*, 2007) y concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 11.4 mg/kg y de 195 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de cromo en hígado de tilapias en La Purísima fue de 6.82 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que supera las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 0.062 mg/kg y de 0.08 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

Cuadro 5.18 Concentraciones de metales en hígado de diferentes especies

Sitio de estudio	Organismo	Niveles de metal encontrados (mg/kg)											
		Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
Presa La Purisima <sup>1</sup>	Tilapia ( <i>Oreochromis sp.</i> )	7.8*	12.1*	0.13*	6.82*	64.0*	1 788.9*	4.099*	8.9*	0.660*	16.8*	10.7*	270.3*
Golfo de Omán <sup>2</sup>	Peces mero punteado naranja ( <i>Epinephelus coioides</i> )	1.29*	3*	11.4*	0.062*	276*	2 866*	0.1*	0.108*	0.002*	17.5*	2.67*	1 714*
Golfo de Omán <sup>2</sup>	Peces emperador relámpago ( <i>Lethrinus nebulosus</i> )	0.675*	22.4*	195*	0.08*	98.8*	1 900*	0.08*	0.426*	< 0.001	22.6*	1.94*	2 400*
Áreas mineras de Missouri, E.U. <sup>3</sup>	Peces rodapiedras ( <i>Campostoma oligolepis</i> )			11.7*					7.79*				219*
Áreas mineras de Missouri, E.U. <sup>3</sup>	Mojarra del sol ( <i>Lepomis megalotis</i> )			30.6*					3.41*				195*
Marismas de la bahía de Cádiz <sup>4</sup>	Fúndulo ( <i>Fundulus heteroclitus</i> )					60.17**	354.42**						
Marismas de la bahía de Cádiz <sup>4</sup>	Lenguado senegalés ( <i>Solea senegalensis</i> )					124.16**	977.71**						

Fuente: <sup>1</sup>Estudio presente; <sup>2</sup>Mora, et al., 2004; <sup>3</sup>Schmitt et al., 2007; <sup>4</sup>Arellano et al., 1999

\*Concentración máxima; \*\*Concentración promedio

La concentración promedio de cobre en hígado de tilapias de La Purísima fue de 64.0 mg/kg (Cuadro 5.18), valor mayor que el reportado para fúndulo (*Fundulus heteroclitus*) en marismas de la bahía de Cádiz cuyas concentraciones promedio fueron de 60.17 mg/kg (Arellano, *et al.*, 1999) y menor que la reportada para el lenguado senegalés (*Solea senegalensis*) de 124.16 mg/kg en ese mismo sitio (Arellano, *et al.*, 1999). También es menor que las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 276 mg/kg y de 98.8 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración promedio de hierro en hígado de tilapias de La Purísima fue de 1 788.9 mg/kg en promedio (Cuadro 5.18), mayor que la reportada para el lenguado senegalés (*Solea senegalensis*) y el fúndulo (*Fundulus heteroclitus*) en marismas de la bahía de Cádiz cuyas concentraciones promedio fueron de 977.71 y 354.42 mg/kg respectivamente (Arellano *et al.*, 1999) pero menor que las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago de 2 866 mg/kg y 1 900 mg/kg respectivamente (De Mora *et al.*, 2004).

La concentración máxima de níquel en hígado de tilapias de La Purísima fue de 4.1 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que es mayor a las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 0.1 mg/kg y 0.08 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de plomo en hígado de tilapias en La Purísima fue de 8.9 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que supera las concentraciones máximas reportadas en áreas mineras de Missouri, E.U, en hígado de peces rodapiedras (*Campostoma oligolepis*) y en mojarra del sol (*Lepomis megalotis*) con concentraciones máximas de 7.79 mg/kg y 3.41 mg/kg respectivamente (Schmitt *et al.*, 2007) y en el Golfo de Omán en peces mero punteado naranja y emperador relámpago con concentraciones máximas de 0.108 mg/kg y 0.426 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de antimonio en hígado de tilapias en La Purísima fue de 0.660 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que es superior a las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y emperador relámpago con concentraciones máximas de 0.002 mg/kg y de no detectadas (<0.001 mg/kg) respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de selenio en hígado de tilapias de La Purísima fue de 16.8 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que es ligeramente inferior a las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 17.5 mg/kg y de 22.6 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de vanadio en hígado de tilapias de La Purísima fue de 10.7 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que supera las concentraciones máximas reportadas en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 2.67 mg/kg y 1.94 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).

La concentración máxima de zinc en hígado de tilapias en La Purísima fue de 270.3 mg/kg (Cuadro 5.18), valor que supera las concentraciones máximas reportadas en áreas mineras de Missouri, E.U, en hígado de peces rodapiedras y en mojarra del sol con concentraciones máximas de 219 mg/kg y de 195 mg/kg respectivamente (Schmitt *et al.*, 2007). Estos valores son menores que los reportados en el Golfo de Omán en hígado de peces mero punteado naranja y en peces emperador relámpago con concentraciones máximas de 1 714 mg/kg y 2 400 mg/kg respectivamente (De Mora, *et al.*, 2004).



## Metales en branquias

Todos los metales analizados fueron encontrados en branquias (Cuadro 5.19), a excepción de la plata y el plomo que solo fueron detectados en un punto de muestreo (punto 7 y 5 respectivamente). El litio fue el metal encontrado en mayor concentración en branquias (231.1 mg/kg en promedio) y el plomo el de menor concentración (0.004 mg/kg en promedio). Las concentraciones de metales encontradas presentaron el siguiente orden descendente: Li > Fe > Zn > Se > As > Cu > V > Sb > Ni > Cr > Ag > Cd > Pb.

La concentración promedio de arsénico en branquias de tilapia de La Purísima (3.6 mg/kg) fue menor que la reportada para la carpa (*Cyprinus carpio*) en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo, donde se reportaron concentraciones promedio de 7 mg/kg (Bustos *et al.*, 2006).

La concentración promedio de cromo en branquias de tilapia en La Purísima (0.249 mg/kg) fue mayor que la reportada para la carpa (*Cyprinus carpio*) en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo donde las concentraciones promedio estuvieron por abajo del límite de detección (<0.05 mg/kg) (Bustos *et al.*, 2006).

La concentración promedio de selenio en branquias de tilapia de La Purísima (6.0 mg/kg) es mayor que la reportada por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato en branquias de la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idellus*) en esta misma presa en el 2005 (2.045 mg/kg).

Cuadro 5.19 Concentraciones de metales en branquias de peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima\*

Elemento	Puntos de muestreo							Concentración máxima	Concentración mínima	Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7				
Ag	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.37	ND	0.05	0.14	
As	5.0	4.0	3.1	3.3	2.4	3.6	5.0	2.4	3.6	0.8	
Cd	0.007	0.011	0.012	0.017	0.016	0.009	0.015	0.007	0.012	0.004	
Cr	0.11	0.15	0.20	0.03	0.21	0.65	0.65	0.03	0.25	0.21	
Cu	2.1	2.3	2.3	2.8	3.5	2.2	4.7	2.1	2.9	1.0	
Fe	179.4	191.3	191.2	180.5	273.6	233.1	363.0	179.4	230.3	67.8	
Li	92.1	94.4	91.7	103.0	88.7	428.7	719.3	88.7	231.1	248.8	
Ni	0.29	0.49	0.31	0.24	0.39	0.60	0.63	0.24	0.42	0.16	
Pb	ND	ND	ND	ND	0.026	ND	0.026	ND	0.004	0.010	
Sb	0.51	0.39	0.86	0.29	0.28	1.10	1.10	0.24	0.52	0.33	
Se	5.4	4.9	6.8	5.9	7.2	5.0	7.1	4.9	6.0	0.9	
V	0.6	1.0	1.3	1.1	1.1	1.0	1.4	0.6	1.1	0.2	
Zn	119.5	161.4	130.0	155.4	132.0	111.2	100.0	100.0	130.0	22.3	

\*Concentraciones en mg/kg; ND: No detectado

La concentración promedio de zinc en branquias de tilapia de La Purísima (130.0 mg/kg) es superior que la reportada por la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato en branquias de la carpa herbívora (*Ctenopharyngodon idellus*) en esta presa en el 2005 (92.01 mg/kg) y es menor que la reportada para la carpa común (*Cyprinus carpio*) en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo donde la concentración promedio fue de 1 255 mg/kg (Bustos *et al.*, 2006).

Para el resto de los metales no se encontró información con la cual comparar.

### **Metales en vísceras**

Todos los metales analizados fueron encontrados en vísceras (Cuadro 5.20). El hierro fue el metal encontrado en mayor concentración en vísceras (4 644.6 mg/kg en promedio) y el antimonio fue el encontrado en menor concentración (0.08 mg/kg en promedio). Las concentraciones promedio de metales presentan un comportamiento en el siguiente orden descendente: Fe > Zn > Li > Cu > As > V > Pb > Cr > Se > Ni > Ag > Cd > Sb.

El intervalo de concentración de plata en vísceras de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.1 a 2.7 mg/kg con un promedio de 1.4 mg/kg (Cuadro 5.20). Los valores de plata encontrados en La Purísima son mayores a los reportados en esta misma presa en el 2005 (SDA) en músculo de tilapia (*Oreochromis aureus*) donde, las concentraciones se encontraron por debajo de los límites de detección (<0.10 mg/kg).

El intervalo de concentración de arsénico en vísceras de tilapia de la presa La Purísima fue de 4.4 a 40.0 mg/kg con un promedio de 22.9 mg/kg (Cuadro 5.20). Estos valores promedios son superiores a los reportados en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo en carpa (*Cyprinus carpio*) con concentraciones de 5 mg/kg (Bustos *et al.*, 2006).

El intervalo de concentración de cadmio en vísceras de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.06 a 0.37 mg/kg con un promedio de 0.20 mg/kg (Cuadro

5.20). Los valores de cadmio encontrados en La Purísima son superiores a los reportados en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo en carpa (*Cyprinus carpio*) donde el cadmio se encontró por debajo de los límites de detección (<0.025 mg/kg) (Bustos *et al.*, 2006).

El intervalo de concentración de cromo en vísceras de tilapia de la presa La Purísima fue de 0.3 a 18.9 mg/kg con un promedio de 8.1 mg/kg (Cuadro 5.40). Los valores encontrados en La Purísima son superiores a los reportados en esta misma presa en el 2005 (SDA) en vísceras de tilapia (*Oreochromis aureus*) que se encontraron por debajo de los límites de detección (<0.10 mg/kg), y en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo en carpa (*Cyprinus carpio*) donde el cromo se encontró por debajo de los límites de detección de (<0.05 mg/kg) (Bustos *et al.*, 2006).

El intervalo de concentración de plomo en vísceras de tilapia de la presa La Purísima fue de 1.1 a 28.4 mg/kg con un promedio de 12.6 mg/kg (Cuadro 5.40). Estos valores encontrados superan los reportados en esta misma presa en el 2005 (SDA) en vísceras de tilapia (*Oreochromis aureus*) que se encontraron por debajo de los límites de detección (<0.10 mg/kg) y a la reportada en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo en carpa (*Cyprinus carpio*) donde el plomo se encontró por debajo de los límites de detección de (<0.05 mg/kg) (Bustos *et al.*, 2006).

En estudios anteriores en vísceras de tilapia (*Oreochromis aureus*) en la presa La Purísima se reportaron niveles de selenio en un intervalo de 2.816 a 3.980 mg/kg (SDA, 2005). En este estudio se encontraron valores superiores que van de 3.8 a 10.7 mg/kg con un promedio de 6.6 mg/kg (Cuadro 5.40).

Por el contrario, las concentraciones de zinc en vísceras de tilapia encontradas en este estudio de la presa La Purísima (39.1 a 170.4 mg/kg) con un promedio de 82.0 mg/kg (Cuadro 5.40) son menores a las reportadas en la laguna de Tecocomulco en Hidalgo en carpa (*Cyprinus carpio*) donde el zinc se encontró en una concentración de 897 mg/kg (Bustos *et al.*, 2006). Así mismo, la concentración máxima encontrada en el presente estudio es mayor a la reportada en esta misma presa en el año 2005 (SDA) (131.6 mg/kg).

Cuadro 5.20 Concentraciones de metales en vísceras de peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima\*

Elemento	Puntos de muestreo							Concentración máxima	Concentración mínima	Promedio	Desviación estándar
	1	2	3	4	5	6	7				
Ag	0.3	0.3	2.3	2.6	2.7	0.1	1.5	2.7	0.1	1.4	1.2
As	33.5	9.7	19.2	28.1	25.7	4.4	40.0	40.0	4.4	22.9	12.7
Cd	0.13	0.10	0.18	0.37	0.29	0.06	0.24	0.37	0.06	0.20	0.11
Cr	3.3	2.0	5.9	18.9	14.4	0.3	11.9	18.9	0.3	8.1	7.0
Cu	8.6	26.1	19.4	55.7	38.2	26.5	28.9	55.7	8.6	29.1	14.8
Fe	2527.9	1708.0	4170	10003	7753.9	347.5	6002.4	10003.3	347.5	4644.6	3464.6
Li	30.3	20.7	45.2	76.2	67.3	5.1	54.6	76.2	5.1	42.8	25.6
Ni	2.4	1.7	3.5	11.1	8.2	0.5	6.9	11.1	0.5	4.9	3.9
Pb	4.1	3.5	9.0	28.4	24.2	1.1	17.7	28.4	1.1	12.6	10.9
Sb	0.04	0.03	0.08	0.22	0.11	0.08	0.03	0.23	0.03	0.08	0.07
Se	3.8	4.4	6.5	10.7	7.8	5.6	7.2	10.7	3.8	6.6	2.3
V	7.2	5.2	12.6	30.8	23.9	1.0	19.8	30.8	1.0	14.3	10.9
Zn	39.1	51.1	85.6	170.4	101.5	55.9	70.2	170.4	39.1	82.0	44.4

\*Concentraciones en mg/kg en peso seco

En general, el comportamiento de las concentraciones promedio de los metales en los diferentes tejidos fue muy variable (Figura 5.48). El arsénico y el hierro presentaron concentraciones mayores en vísceras > hígado > branquias > hueso > músculo; el cromo y el níquel también se comportaron de manera similar (solo intercambiando la posición entre el músculo y el hueso) siendo las concentraciones mayores en vísceras > hígado > branquias > músculo > hueso; el cadmio y el vanadio presentaron concentraciones mayores en vísceras > hígado > hueso > branquias > músculo; el plomo también presentó un comportamiento similar al cadmio y vanadio (intercambiando la posición entre branquias y músculo): vísceras > hígado > hueso > músculo > branquias; el cobre y el selenio presentaron concentraciones mayores en hígado > vísceras > branquias > músculo > hueso; plata y zinc presentaron las mayores concentraciones en hígado y las menores en músculo con concentraciones para plata: hígado > vísceras > hueso > branquias > músculo y para zinc: hígado > branquias > vísceras > hueso > músculo. Por otra parte, litio y antimonio presentaron las mayores concentraciones en branquias y las menores en músculo, siendo el comportamiento: para litio branquias > hueso > vísceras > hígado > músculo y para antimonio branquias > hueso > hígado > vísceras > músculo.

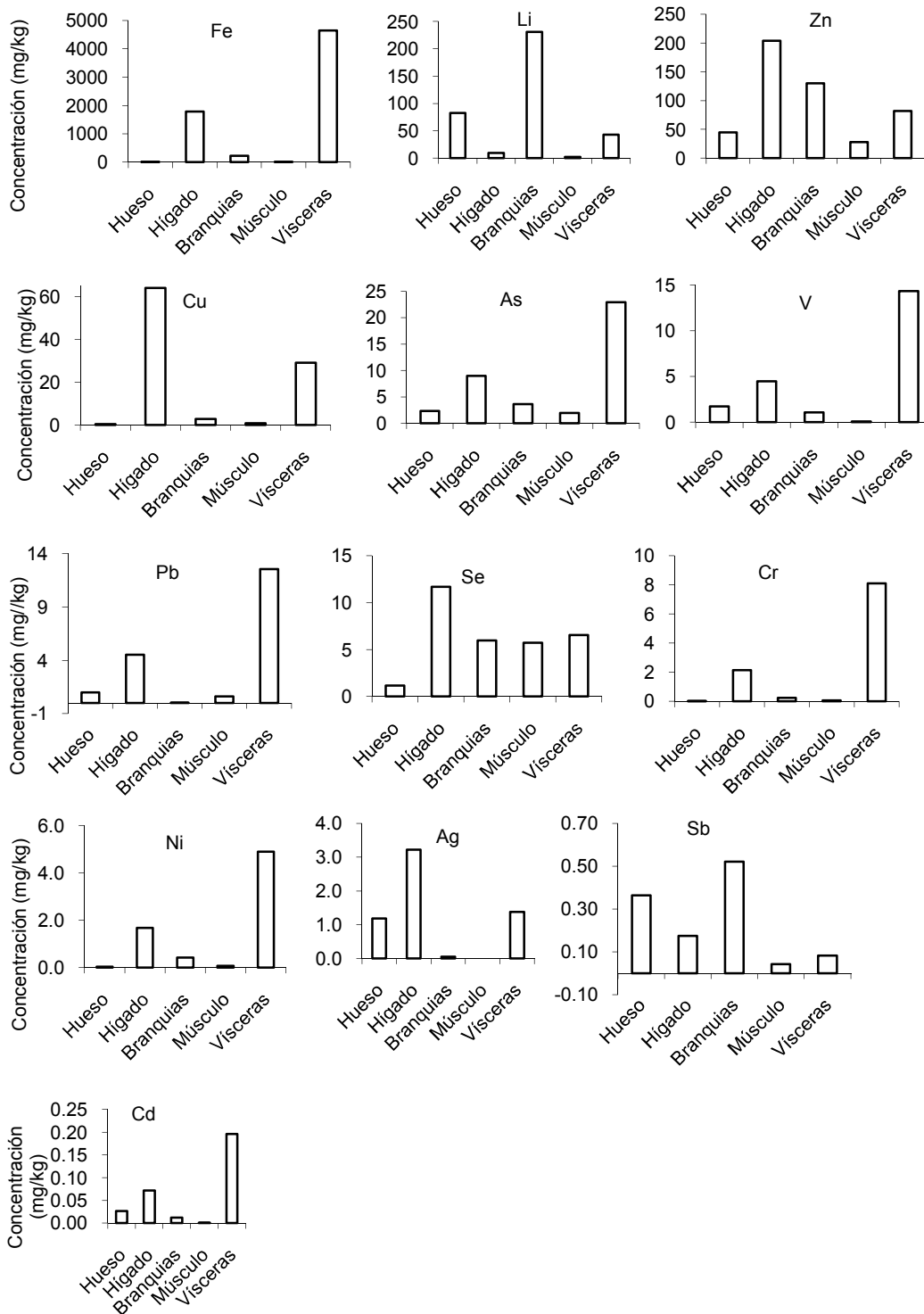


Figura 5.48. Concentraciones de los trece metales analizados en los diferentes tejidos (hueso, hígado, branquias, músculo y vísceras) de los peces (*Oreochromis sp.*) de la presa La Purísima.

## VI CONCLUSIONES

- a) Los estudios realizados en agua y sedimento indican que la presa La Purísima no se encuentra afectada por contaminantes orgánicos de origen antropogénico (plaguicidas organoclorados y organofosforados, hidrocarburos fracción media y poliaromáticos). En cambio, sí se presentaron concentraciones altas de coliformes en algunos puntos de la presa que podrían generar afecciones gastrointestinales entre los usuarios del agua. Así mismo, el agua de la presa presenta concentraciones altas de fósforo que no alcanzan a comprometer el estado de la presa pero podrían originar un proceso de eutroficación si continúan aumentando sus niveles.
- b) La concentración de los metales analizados en agua no representan un riesgo a la salud o para la vida acuática a excepción del mercurio, hierro y selenio que rebasan los límites permitidos por la normatividad mexicana. El comportamiento del hierro y el selenio a través de la presa apunta a que la fuente de dichos metales es el río Guanajuato.
- c) Los sedimentos de la presa presentan concentraciones considerables de diversos metales (Ag, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) que pudieran ocasionar efectos en organismos bentónicos y las concentraciones de mercurio y vanadio superan los límites máximos legislados.
- d) El hallazgo de las especies de peces *Xenotoca variata* y *Goodea atripinnis* en la presa resulta de gran importancia debido a que son endémicos de México y están protegidos por la normatividad, esta situación eleva la importancia de la protección de La Purísima para la conservación de estas especies.
- e) Se requiere una evaluación de un biomarcador adicional que complemente los resultados generados por los biomarcadores analizados en tejidos de los peces (lipoperoxidación y acetilcolinesterasa) para evaluar la afectación del agua de la presa sobre los peces (especialmente por la presencia de metales).



- f) El índice de calidad del agua indica que la calidad del agua de la presa La Purísima es aceptable (considerando los parámetros utilizados y la dimensión temporal de esta afirmación).
- g) La concentración de plomo en el músculo de tilapias puede representar un riesgo en el consumo de los pescados de la presa pues rebasa el límite máximo permisible por la normatividad mexicana para pescado fresco-refrigerado.

## VII LITERATURA CITADA

- Acevedo, D, Jiménez, B & Rodríguez, C 2006, 'Trace metals in sediments of two estuarine laggons from Puerto Rico'. *Environmental Pollution*, vol. 141, pp. 336-342.
- Ackay, H, Oguz, A & Karapire 2003, 'Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments'. *Water Research*, vol. 37, pp. 813-822.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1990, Toxicological profile for silver, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1992a, Toxicological profile for antimony and compounds, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1992b, Toxicological profile for vanadium and compounds, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1994, Toxicological profile for copper, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1995, Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1999a, Toxicological profile for cadmium, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1999b, Toxicological profile for mercury, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 1999c, Toxicological profile for Uranium, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2000, Toxicological profile for chromium, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2003, Toxicological profile for selenium, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2005a, Toxicological profile for nickel, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2005b, Toxicological profile for zinc, Georgia.

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2006, Draft Toxicological profile for aluminum, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2007a, Toxicological profile for arsenic, Georgia.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) 2007b, Toxicological profile for lead, Georgia.
- Alvarez, J 1970, *Peces mexicanos: claves*, Instituto Nacional de Investigaciones biológico pesqueras. Comisión nacional consultiva de pesca. México.
- Arellano, J, Ortiz, J, Capeta Da Silva, D, González de Canales, M, Sarasquete, C & Blasco, J 1999, 'Levels of copper, zinc, manganese and iron in two fish species from SALT marshes of Cadiz Bay (Southwest Iberian Peninsula)', *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.*, vol. 14, no. 1-4, pp. 485-488.
- Avila P, Frías, H, Zarazúa, G & Rodríguez, A 1997, Caracterización elemental de los sedimentos de la presa J. A. Alzate, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 4-7 noviembre 1997, Zacatecas, Zac. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Sección Mexicana de la AIDIS.
- Avila, P, Zarazúa, O, Barceló, Q, Sánchez, M & Solís C 1996, Dinámica del Cr, Ni, y Zn en la presa J.A. Alzate en el Edo. de México, X Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 14-16 febrero 1996, Toluca, Mex. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental y Sección Mexicana de la AIDIS.
- Bahena, J & Rosales, L 2002, 'Spatial and temporal variation of heavy metals in a tropical estuary', *Environmental Geology*, vol. 42, pp. 575-582.
- Baird, C 2001, *Química Ambiental*, Reverté, Barcelona
- Barceló, I, Bussy, A, Solís, A, Avila, P, Carapia, L & Barrios, L 2002, Evaluación de los contaminantes metálicos de los sedimentos de la presa J.A. Alzate en el Edo. de México, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 27-31 octubre 2002, Cancún, México.
- Bonaventura, C & Johnson, F 1997, 'Healthy environments for healthy people: bioremediation today and tomorrow', *Environmental Health Perspective*, vol. 105, Supplement 1, pp. 5-20.
- Buege, J & Aust, S 1978, 'Microsomal lipid peroxidation'. *Methods in Enzymology*, vol. 52, pp. 302-307.
- Bustos, Z, Monks, W, Prieto, F & Román, A 2006 Estudio de bioacumulación de metales pesados en la carpa (*Cyprinus Carpio*) de la laguna de Tecocomulco en Hidalgo. VIII Congreso Nacional de Ciencias de los Alimentos. 1-2 Junio

- 2006, Monterrey, N.L. Universidad de Guanajuato, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Cano, I, Gómez, F, Ramírez, V, Martínez, P, Rodríguez, E y Aguilera, A 2000, 'Determinación de contaminantes en la presa La Purísima y su efecto en el sistema de pozos Puenteillas de Guanajuato', Serie latinoamericana, no. 20, pp. 123-133.
- Cano, I, Gómez, F, Aguilera, A, de la Rosa, G, & Gardea, J 2004, 'Transporte y destino final de fósforo en el acuífero de Puenteillas de Guanajuato', *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 3, pp. 201-208.
- Centro de Estudios y Control de Contaminantes (CESCCO) & Ecole Polytechnique Fédéral (EPFL) 1994, 'Determinación de plomo y cobre en peces y manejo de sus residuos en el lago de Yojoa, Honduras', *Contaminantes químicos/ Monografía 5-94. Tegucigalpa, Honduras*
- Convención de Estocolmo en Contaminantes Orgánicos Persistentes, 2001.
- Convenio de Róterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo aplicable a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional, 2005.
- De Mora, S, Fowler, S, Wyse, E & Azemard, S 2004, 'Distribution of heavy metals in marine bivalves, fish and coastal sediments in the Gulf and Gulf of Oman', *Marine Pollution Bulletin*, vol. 49, pp. 410-424.
- Delistraty, D & Yokel, J 2007, 'Chemical and ecotoxicological characterization of Columbia River sediments below the Hanford site (USA)', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 66, pp. 16-28.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) 1989, Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. CE-CCA-001/89.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) 2007, Ley Federal de Derechos, México. 24-12-2007.
- Dinius, S 1987, 'Design of an Index of Water Quality', *Water Resources Bulletin*, vol. 23, no. 5, pp. 833-843.
- Division of Water (DoW) 1998, Division of water, technical and operational guidance series (1.1.1) Ambient water quality standards and guidance values and groundwater effluent limitations, New York Department of Environmental Conservation.

- Domínguez, A, Góngora, A, Muñoz, N, Hernández, M & Escobedo, D 2004. Análisis de la concentración de metales pesados en tres poblaciones de almeja chocolate *Megapitaria squalida* en el norte de Sinaloa, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 12-14 mayo 2004, Mazatlán, Sinaloa. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- Environmental Canada (EC) 1999, Guidance Document on Application and Interpretation on Single-species Test in Environmental Toxicology, Canada.
- Environment Canada (EC) 2000, Biological Test Method: Reference Method for Determining Acute Lethality of Effluents to Rainbow Trout, Environmental protection series, EPS 1/RM/13 Second Edition – December 2000, Ottawa, Ontario
- Environmental Protection Agency (EPA) 1986, Method 8310 Polynuclear aromatic hydrocarbons.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1986b, Recommended protocols for measuring conventional sediment variables in Puget Sound. Washington.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1990, Recommended protocols for measuring conventional water quality variables and metals in fresh water of the Puget Sound Region. Washington.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1993, Selecting Remediation Techniques For Contaminated Sediment. EPA-823-B93-001, Washington.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1994 Method 7470A, Mercury in liquid waste (manual cold-vapor technique).
- Environmental Protection Agency (EPA) 1994b Method 7471A, Mercury in solid or semisolid waste (manual cold-vapor technique).
- Environmental Protection Agency (EPA) 1994c, Recommended guidelines for sampling marine mammals tissue for chemical analyses in Puget Sound. Washington.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1996, Method 3050B Acid digestion of sediments, sludges and soils.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1996b, Method 8015B Nonhalogenated organics using GC/FID.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1996c, Method 8081A Organochlorine pesticides by gas chromatography.

- Environmental Protection Agency (EPA) 1998a, Method 8141B Organophosphorus compounds by gas chromatography.
- Environmental Protection Agency (EPA) 1998b, Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water. EPA/600/R-987128, Washington.
- Environmental Protection Agency (EPA) 2003, National Management Measures to Control Nonpoint Pollution from Agriculture. EPA 841-B-03-004, Washington.
- Fatoki, O & Awofolu, R 2003, 'Levels of Cd, Hg and Zn in some surface waters from the Eastern Cape Province, South Africa', *Water SA*, vol. 29, no. 4, pp. 375-380.
- Favari, L, Madrigal, M & López, E 2003, 'Efecto del agua del embalse De La Vega en la lipoperoxidación y los niveles de la acetilcolinesterasa en el hígado y en el músculo de *Xiphophorus helleri*', *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 19, no. 3, pp. 145-155.
- Ferreira, M, Moradas, P & Reis M 2005, 'Oxidative stress biomarkers in two resident species, mullet (*Mugil cephalus*) and flounder (*Platichthys flesus*), from a polluted site in River Douro Estuary, Portugal', *Aquatic Toxicology*, vol. 71, pp. 39-48.
- Flores, J, & Scott, C 2000, 'Superficie agrícola estimada mediante análisis de imágenes de satélite en Guanajuato, México', *Serie Latinoamericana*, no. 15
- Flores, P & Gabino, R 2004. Estudio limnológico en la laguna de Zumpango, Estado de México, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 12-14 mayo 2004, Mazatlán, Sinaloa. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- Franco, F, Bautista, T & Guerra, E 2006, Caracterización limnológica de corrientes superficiales en la subcuenca Nexapa en el estado de Puebla, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. 24-26 mayo 2006, Guadalajara, Jal. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Gobierno del estado de Jalisco.
- García, L, Soto, M, Jara, M & Gómez, A 2004, 'Fracciones geoquímicas de Cd, Cu, y Pb en sedimentos costeros superficiales de zonas ostrícolas del estado de Sonora, México', *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 20, no. 4, pp. 159-167.
- Ghrefat, H & Yusuf, N 2006, 'Assessing Mn, Fe, Cu, Zn and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan', *Chemosphere*, vol. 65, pp. 2114-2121.

Gobierno del estado de Guanajuato 2003, Informe Ambiental del Estado de Guanajuato 2003. Resumen Ejecutivo

Gómez, F 2000, 'Simulación del comportamiento del fósforo en el agua de la presa La Purísima y su efecto en los pozos del sistema Puentecillas', Tesis de licenciatura, Universidad de Guanajuato, México.

Graniel, C & Carrillo, M 2006, Contaminación del río Zanatenco del estado de Chiapas, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. 24-26 mayo 2006, Guadalajara, Jal. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Gobierno del estado de Jalisco.

HACH 2003a, Method 8125: Color, True and Apparent. Platinum-Cobalt Standard Method.

HACH 2003b, Method 8131: Sulfide: Methylene Blue Method.

Haynes, D & Johnson, J 2000, 'Organochlorine, heavy metal and polyaromatic hydrocarbon pollutant concentrations in the great barrier reef. (Australia) environment: a review', *Marine Pollution Bulletin*, vol. 41, no. 7-12, pp. 267-278.

Henry, J & Heinke, G 1999, *Ingeniería Ambiental*, Prentice Hall, Pearson Education México.

Hestrin, S 1949, 'The reaction of acetylcholine and other carboxylic acid derivatives with hydroxylamine and its analytical application', *The Journal of Biological Chemistry*, vol. 180, pp 249-261.

Hose, G, Lim, R, Hyne R & Pablo, F 2002 'A pulse of endosulfan-contaminated sediment affects macroinvertebrates in artificial streams', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 51, pp 42-52

Instituto Nacional de Ecología (INE) & Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) 2006, *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología, México.

Lam, P & Gray, J 2003, 'The use of biomarkers in environmental monitoring programmes', *Marine Pollution Bulletin*, vol. 46, pp. 182-186.

Lau, P & Wong, H 2003, 'Effect of size, tissue parts and location on six biochemical markers in the green-lipped mussel, *Perna viridis*', *Marine Pollution Bulletin*, vol.46, pp. 1563-1572.

Lau, P, Wong, H & Garrigues, P 2004, 'Seasonal variation in antioxidative responses and acetylcholinesterase activity in *Perna viridis* in eastern oceanic

- and western estuarine waters of Hong Kong', *Continental Shelf Research*, vol. 24, pp. 1969-1987.
- Long, E, MacDonald, D, Smith, S & Calder, F 1995 'Incidence of Adverse Biological Effects Within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments', *Environmental Management*, vol. 19, no. 1, pp. 81-97.
- López, E, Sedeño, E & Perozzi, F 2006 'Lipid peroxidation and Acetylcholinesterase activity as biomarkers in the Black Sailfin Goodeid, *Girardinichthys viviparus* (Bustamante) exposed to water from lake Xochimilco (Mexico)', *Aquatic Ecosystem Health & Management*, vol. 9, no. 3, pp. 379-385.
- Marine Environmental Support Office (MESO) 2002, Critical Issues for Contaminated Sediment Management, MESO-02-TM-01, California.
- Martínez, J 1997, Estudio de saneamiento integral del Río Amecameca, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 4-7 noviembre 1997, Zacatecas, Zac. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Sección Mexicana de la AIDIS
- Martínez, L, Gómez, L, Galar, M & López, E 2002, 'Estrés producido por sedimentos contaminados con níquel en una granja de trucha arcoiris, *Oncorhynchus mykiss* (Pisces: Salmonidae)', *Revista de biología tropical*, vol. 50, pp. 1159-1168.
- Matozzo, V, Tomei, A & Marin M 2005, 'Acetylcholinesterase as a biomarker of exposure to neurotoxic compounds in the clam *Tapes philippinarum* from the Lagoon of Venice', *Marine Pollution Bulletin*, vol. 50, pp. 1686-1693.
- McCready, S, Birch, G & Long, E 2006, 'Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity – A chemical dataset for evaluating sediment quality guidelines', *Environmental International*, vol. 32, pp. 455 – 465.
- Medina, M, Rivera, R, Wruck, S, Gómez, G, Cortés, T, Viramontes, P, Palma, M, Olvera, S, Yañez, K, Aguayo, M & Pérez, J 2004, 'Conservación y manejo participativo en microcuencas de la subcuenca La Purísima, Guanajuato', en H Cotler (ed.) *Manejo integral de cuencas en México: Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*, SEMARNAT-INE, México, pp. 225-246.
- Medina, R, Zetina, C, Comas B & Pat, R 2004, 'Concentración de Cd, Cr, Cu y Pb en sedimentos y en tres especies de pepino de mar (clase *Holothuroidea*) de las costas del estado de Yucatán, México', *Ingeniería Revista Académica*, vol. 8, no. 2, pp. 7-19.
- Nelson, C & Lamothe, P 1993, 'Heavy metal anomalies in the Tinto and Odiel River and Estuary System, Spain', *Estuaries*, vol. 16, no. 3A, pp. 496-511.



Norma Mexicana NMX-AA-007-2000 Análisis de Agua-Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-008-2000 Análisis de Agua-Determinación del pH- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-012-2001 Análisis de Agua-Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-028-2001 Análisis de Agua-Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-034-2001 Análisis de Agua-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-036-2001 Análisis de Agua-Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-039-2001 Análisis de Agua-Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-42-1987 Calidad del Agua-Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* presuntiva.

Norma Mexicana NMX-AA-051-2001 Análisis de Agua-Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-072-2001 Análisis de Agua-Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-073-2001 Análisis de Agua-Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-079-2001 Análisis de Agua-Determinación de nitratos en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-AA-093-2000 Análisis de Agua-Determinación de la conductividad electrolítica- Método de prueba.

Norma Mexicana NMX-Z-12/1-1987 Muestreo para la inspección por atributos- parte 1: Información general y aplicaciones.

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

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.

Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.

Norma Oficial Mexicana NOM-027-SSA1-1993, Bienes y Servicios. Productos de la pesca. Pescados frescos-refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.

Norma Oficial Mexicana NOM-112-SSA1-1994, Bienes y Servicios. Determinación de bacterias coliformes. Técnica del número más probable.

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

Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003, Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelo y las especificaciones para su caracterización y remediación.

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Department of Environmental Quality (DEQ) 2003, 'Fish tissue metals analysis in the Tri-state mining area, Final Report', *Oklahoma, E, U*

Pérez, E, Blasco, J & Solé M 2004, 'Biomarker responses to pollution in two invertebrate species: *Scrobicularia plana* and *Nereis diversicolor* from the Cádiz bay (SW Spain)', *Marine Environmental Research*, vol. 58, pp. 275-279.

Periódico Oficial del gobierno del estado de Guanajuato, 2005 Núm. 188, Año XCII, Tomo CXLIII. (25 de Noviembre de 2005).

- Pfeifer, S, Schiedek, D & Dippner, J 2005, 'Effect of temperature and salinity on acetylcholinesterase activity, a common pollution biomarker, in *Mytilus* sp. from the south-western Baltic Sea', *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 320, pp. 93-103.
- Puget Sound Action Team (PSTA) 2003, Status, trends and effects of toxic contaminants in the Puget Sound environment: Recommendations, Washington.
- Rickwood, C & Galloway, T 2004 'Acetylcholinesterase inhibition as a biomarker of adverse effect', *Aquatic Toxicology*, vol. 67, pp. 45-56.
- Robles E, Ramírez, P, Durán, A, Martínez, B, Ayala, R, Sáinz, M, Martínez, M & Cortés, R 2004. Estudio fisicoquímico del agua de la presa Valle de Bravo, Estado de México, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 12-14 mayo 2004, Mazatlán, Sinaloa. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- Robles E, Ramírez, P, Martínez, M, Sáinz, M, González, M, Martínez, B & Ayala, R 2004b. Determinación de nutrientes y materia orgánica en el lago de Xochimilco, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 12-14 mayo 2004, Mazatlán, Sinaloa. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales.
- Rowe, A, Nixon, E, McGovern, E, McManus, M & Smyth, M (Fisheries Research Centre) 1998, Metal and organo-chlorine concentrations in fin-fish from Irish waters in 1995. Marine Environmental Series 1/98. Marine Institute. Abbotstown, Dublin
- Sandoval, M 1987, 'Investigación de la calidad del agua contenida en la presa "La Purísima" de Irapuato, Gto., para su empleo como agua potable', Tesis de licenciatura, Universidad de Guanajuato, México.
- Sarkar, A, Ray, D, Shrivastava, A & Sarker, S 2006, 'Molecular Biomarkers: Their significance and application in marine pollution monitoring', *Ecotoxicology*, vol. 15, pp. 333-340.
- Sayeed, I, Parvez, S, Pandey, S, Bin, B, Rizwanul, H & Raisuddin, S 2003, 'Oxidative stress biomarkers of exposure to deltamethrin in freshwater fish, *Channa punctatus* Bloch', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 56, pp. 295-301.
- Schmitt, C, Brumbaugh, W & May, T 2007, 'Accumulation of metals in fish from lead-zinc mining areas of southeastern Missouri, USA', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 67, pp. 14-30

- Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Guanajuato (SDA) 2005, Estudio del estado que guarda la pesca en la presa la Purísima, Gto.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) 2005, Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales. México.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) 2003, Desarrollos de niveles guía nacionales de calidad de agua ambiente correspondientes a nitratos y nitritos. Argentina. consultado: 29-05-07 (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/pdfs/nitratos%20y%20nitritos.pdf>)
- Tejeda, R, López, E & Sedeño, E 2007 'Biomarkers and bioindicators of the health condition of *Ameca splendens* and *Goodea atripinnis* (Pisces: Goodeidae) in the Ameca River, Mexico', *Environment International*, vol. 33, pp. 521-531.
- Traina, S & Laperche V 1999 'Contaminant bioavailability in soils, sediments, and aquatic environments', *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 96, pp. 3365-3371.
- Tuzen, M & Soylak, M 2007, 'Determination of trace metal in canned fish marketed in Turkey', *Food Chemistry*, vol. 101, pp. 1378-1382.
- U.S. Geological Survey (USGS) 2006, The Quality of Our Nation's Waters: Pesticide in the Nation's Streams and Ground Water, 1992-2001. U.S. Geological Survey Circular 1291, Virginia.
- Van, K, Goenaga, H, Adams, F & Blust, R 2004, 'Induction and binding of Cd, Cu, and Zn to metallothionein in carp (*Cyprinus carpio*) using HPLC-ICP-TOFMS', *Toxicological Sciences*, vol. 80, pp. 276-287.
- van der Oost, R, Beyer, J & Vermeulen, N 2003, 'Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review', *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 13, pp. 57-149.
- Villegas, J, Campos, L & Guerra, E 2006, Caracterización física, química y biológica de dos cuerpos de agua de almacenamiento en el municipio de Chignahuapan, Puebla, XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. 24-26 mayo 2006, Guadalajara, Jal. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Gobierno del estado de Jalisco.
- Volke, T, Velasco, J & de la Rosa, D 2005, Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. INE-SEMARNAT, México.
- Vukadin, I & Odzak, N 1990, in G Gabrielides (ed), 'MAP Technical Reports Series No, 59: Proceedings of the FAO/UNEP/IAEA consultation meeting on the

*accumulation and transformation of chemical contaminants by biotic and abiotic processes in the marine environment*, United Nations Environment Programme (UNEP) & Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Italy, pp. 363-368.

Warner, K, Bonzongo, J, Roden, E, Ward, G, Green, A, Chaubey, I, Lyons, W & Arrington, D 2005 'Effect of watershed parameters on mercury distribution in different environmental compartments in the Mobile Alabama River Basin, USA', *Science of the Total Environment*, vol. 347, pp. 187-207.

World Health Organization (WHO) International Programme on Chemical Safety (IPCS), 1993. Biomarkers and risk assessment: concepts and principles. Environmental Health Criteria 155, World Health Organization, Geneva.

World Health Organization (WHO) 2006, Guidelines for drinking-water quality: first addendum to third edition, vol. 1: recommendations

Yongming, H, Peixuan, D, Junji, C & Posmentier, E 2006 'Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China', *Science of the Total Environment*, vol. 355, pp. 176-186.

Zambrano, R, Romero C, Robledo, M, Bautista, J Najera, O & González, L 2004, 'Niveles de contaminación por metales pesados en sedimentos y peces de la presa Aguamilpa, Nayarit'. Revisado septiembre 12, 2006, de <http://www.cocyten.gob.mx/desc/ARTICULO2004CN12M.pdf#search=%22metales%20pesados%20sedimentos%20nayarit%C2%B4%22>

## VIII APÉNDICE

Cuadro A. 1 Coordenadas de los puntos de muestreo de la Presa La Purísima (abril y octubre)

<i>Puntos de muestreo</i>	<i>Abril</i>		<i>Octubre</i>	
	<i>Latitud (Norte)</i>	<i>Longitud (Oeste)</i>	<i>Latitud (Norte)</i>	<i>Longitud (Oeste)</i>
1	20° 52' 06"	101° 16' 44"	20° 52' 06"	101° 16' 44"
2	20° 52' 16"	101° 17' 25"	20° 52' 02"	101° 17' 06"
3	20° 52' 34"	101° 17' 30"	20° 52' 32"	101° 17' 52"
4	20° 52' 38"	101° 16' 33"	20° 52' 32"	101° 16' 59"
5	20° 53' 03"	101° 16' 21"	20° 53' 00"	101° 16' 43"
6	20° 53' 16"	101° 16' 45"	20° 53' 28"	101° 16' 55"
7	20° 53' 31"	101° 16' 41"	20° 53' 47"	101° 17' 02"
8	20° 53' 43"	101° 16' 41"	20° 53' 59"	101° 17' 10"
9	20° 53' 49"	101° 16' 41"	20° 54' 22"	101° 17' 11"
10	20° 53' 53"	101° 16' 43"	20° 54' 55"	101° 17' 11"

Cuadro A. 2 Matriz de correlación de las concentraciones de metales en agua de la presa La Purísima en el mes de abril (primer muestreo).

	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
Ag	1.00													
As	0.71	1.00												
Cd	0.26	0.43	1.00											
Cr	0.81	0.51	0.26	1.00										
Cu	0.68	0.85	0.62	0.65	1.00									
Fe	0.92	0.81	0.06	0.72	0.68	1.00								
Hg	0.04	-0.52	0.00	0.16	-0.15	-0.25	1.00							
Li	0.77	0.72	0.14	0.49	0.46	0.84	-0.51	1.00						
Ni	0.83	0.68	0.32	0.85	0.88	0.80	0.15	0.45	1.00					
Pb	0.93	0.87	0.18	0.74	0.78	0.99	-0.25	0.82	0.84	1.00				
Sb	0.92	0.91	0.35	0.68	0.79	0.95	-0.32	0.88	0.77	0.97	1.00			
Se	0.02	0.69	0.35	-0.06	0.62	0.24	-0.63	0.15	0.27	0.33	0.36	1.00		
V	0.92	0.83	0.08	0.70	0.67	1.00	-0.29	0.87	0.77	0.99	0.96	0.25	1.00	
Zn	-0.06	0.22	0.93	-0.08	0.34	-0.24	-0.09	-0.02	-0.04	-0.12	0.09	0.32	-0.21	1.00

Cuadro A. 3 Matriz de correlación de las concentraciones de metales en agua de la presa La Purísima en el mes de octubre (segundo muestreo).

	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn
Ag	1.00													
As	1.00	1.00												
Cd	-0.13	-0.16	1.00											
Cr	0.49	0.50	-0.11	1.00										
Cu	0.32	0.34	-0.30	-0.19	1.00									
Fe	0.97	0.96	0.08	0.44	0.30	1.00								
Hg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00							
Li	1.00	1.00	-0.14	0.48	0.34	0.96	0.00	1.00						
Ni	0.98	0.98	-0.09	0.63	0.25	0.96	0.00	0.98	1.00					
Pb	0.44	0.43	0.72	0.12	0.15	0.65	0.00	0.43	0.46	1.00				
Sb	1.00	0.99	-0.10	0.49	0.34	0.96	0.00	1.00	0.98	0.45	1.00			
Se	1.00	1.00	-0.11	0.49	0.32	0.97	0.00	1.00	0.98	0.45	1.00	1.00		
V	1.00	1.00	-0.14	0.49	0.36	0.97	0.00	1.00	0.98	0.45	0.99	1.00	1.00	
Zn	0.64	0.63	-0.13	0.68	0.07	0.64	0.00	0.63	0.72	0.29	0.64	0.63	0.64	1.00



Cuadro A. 4 Matriz de correlación de las concentraciones de metales en sedimento de la presa La Purísima en el mes de abril (primer muestreo).

	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	Zn
Ag	1.00														
As	0.52	1.00													
Cd	0.59	0.61	1.00												
Cr	0.99	0.54	0.66	1.00											
Cu	0.94	0.64	0.79	0.98	1.00										
Fe	0.93	0.52	0.77	0.96	0.96	1.00									
Hg	0.62	0.54	0.14	0.57	0.52	0.53	1.00								
Li	0.80	0.23	0.63	0.82	0.79	0.91	0.45	1.00							
Ni	0.95	0.64	0.76	0.98	0.99	0.96	0.54	0.79	1.00						
Pb	0.93	0.58	0.80	0.97	0.99	0.97	0.46	0.82	0.99	1.00					
Sb	0.97	0.50	0.41	0.93	0.86	0.84	0.71	0.73	0.87	0.83	1.00				
Se	-0.78	-0.13	-0.14	-0.73	-0.61	-0.58	-0.45	-0.43	-0.63	-0.59	-0.77	1.00			
U	-0.88	-0.37	-0.30	-0.86	-0.79	-0.70	-0.52	-0.52	-0.80	-0.77	-0.87	0.89	1.00		
V	0.99	0.58	0.66	1.00	0.98	0.95	0.60	0.80	0.98	0.96	0.94	-0.71	-0.87	1.00	
Zn	0.74	0.61	0.96	0.79	0.87	0.87	0.21	0.73	0.87	0.89	0.59	-0.30	-0.44	0.78	1.00

Cuadro A. 5 Matriz de correlación de las concentraciones de metales en sedimento de la presa La Purísima en el mes de octubre (segundo muestreo).

	Ag	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Li	Ni	Pb	Sb	Se	U	V	Zn
Ag	1.00														
As	0.12	1.00													
Cd	0.91	0.19	1.00												
Cr	0.98	0.07	0.89	1.00											
Cu	0.97	0.06	0.96	0.97	1.00										
Fe	0.98	0.25	0.87	0.95	0.93	1.00									
Hg	0.94	0.06	0.85	0.90	0.92	0.94	1.00								
Li	0.98	0.19	0.91	0.97	0.95	0.97	0.92	1.00							
Ni	0.98	0.11	0.92	0.99	0.98	0.97	0.93	0.97	1.00						
Pb	0.97	0.17	0.90	0.91	0.94	0.97	0.96	0.93	0.94	1.00					
Sb	0.98	0.26	0.87	0.93	0.92	1.00	0.94	0.96	0.95	0.98	1.00				
Se	0.30	0.15	0.53	0.28	0.44	0.30	0.33	0.25	0.37	0.41	0.33	1.00			
U	-0.79	0.31	-0.71	-0.88	-0.85	-0.71	-0.76	-0.77	-0.84	-0.69	-0.67	-0.20	1.00		
V	0.99	0.11	0.88	0.99	0.96	0.98	0.93	0.97	0.99	0.94	0.96	0.30	-0.83	1.00	
Zn	0.71	0.11	0.92	0.73	0.83	0.63	0.59	0.73	0.74	0.68	0.63	0.54	-0.63	0.68	1.00