

Caracterización de la contaminación por metales pesados y reducción de capacidad de almacenamiento hidráulico por azolve de un embalse mexicano

Assessment of pollution by heavy metals and hydraulic storage capacity reduction by sediment filling of a mexican reservoir

Juan Antonio García Aragón¹ Carlos Díaz-Delgado¹
Emmanuelle Quentin¹ Pedro Ávila Pérez²
Samuel Tejada Vega² y Graciela Zarazúa Ortega²

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, UAEM.
Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México,
C. P. 50130. e-mail: jgarcia@uaemex.mx.

² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Salazar, Estado de México.

García Aragón J. A., C. Díaz-Delgado, E. Quentin, P. Ávila Pérez, S. Tejada Vega y G. Zarazúa Ortega. 2007. Caracterización de la contaminación por metales pesados y reducción de capacidad de almacenamiento hidráulico por azolve de un embalse mexicano. *Hidrobiológica* 17(2): 127-138

RESUMEN

El embalse José Antonio Alzate es el primero sobre el curso del río Lerma y acumula los sedimentos erosionados de la cuenca del Curso Alto del río Lerma (CARL), un área densamente urbanizada. Desde el punto de vista hidráulico, dicho embalse cumple la función de control de avenidas y surte de agua a distritos de riego. La realización reciente de un estudio batimétrico del mismo permitió definir el perfil actual de fondo del terreno. Estos niveles se compararon con los originales (antes de su construcción en 1959) efectuando una estimación del volumen de azolve acumulado. Igualmente se llevó a cabo un muestreo de sedimentos de fondo para su posterior análisis por fluorescencia de rayos X con el fin de determinar su posible contaminación por metales pesados. En este artículo se discuten las implicaciones de la pérdida de capacidad de almacenamiento del embalse (cerca del 50%) y de la contaminación de sus sedimentos determinando los riesgos ambientales asociados por su remoción. Teniendo en cuenta los bajos índices de contaminación por metales pesados, los cuales no sobrepasaron los criterios internacionales para uso de sedimentos en agricultura, y del volumen a dragar inferior a los 65 000 m³, se concluyó que es recomendable dragar la zona aledaña a la obra de toma para seguridad en la operación de esa estructura que es indispensable para cumplir con las funciones del embalse.

Palabras clave: Batimetría, contaminación de sedimentos, metales pesados, embalse.

ABSTRACT

José Antonio Alzate is the first reservoir over the Lerma river and most of the sediments eroded in the upper Lerma river basin, an highly urbanized area, are deposited there. Alzate reservoir, accomplish functions for flood control and for water irrigation supply downstream. Recently a bathymetric study was carried out in order to know the new bottom reservoir profile. These levels were compared with those existing before the dam construction in 1959 and the sediment volume accumulation was obtained. Also a sampling of bottom sediments was obtained in order to make an analysis by X ray fluorescence spectrometry to define possible pollution by heavy metals. This paper, discuss the high reduction in reservoir storage capacity (close to 50%) and the sediment pollution which defines the environmental risks associated with their removal. Taking into account the low pollution concentrations of heavy metals measured,

which do not exceed the standard international criteria for sediment use in agriculture and the relatively low volume of dredging lower than 65 000 m³, it is recommended to dredge the area surrounding the intake structure for operation security, considering how important it is in the reservoir functioning.

Key words: Bathymetry, polluted sediments, heavy metals, reservoir.

INTRODUCCIÓN

Es posible constatar que en el país, desde hace algunos años, ha disminuido la frecuencia de medición del transporte de sedimentos en la mayor parte de las estaciones hidrométricas instaladas (IMTA, 2003); más aún, son escasas las batimetrías actualizadas de los embalses. En la mayoría de los casos, la gestión de los niveles de líquido en dichos cuerpos de agua se realiza bajo la consideración de la capacidad de almacenamiento original; situación que dista mucho de la realidad actual y que incrementa el riesgo de inundaciones de las regiones situadas aguas arriba de las cortinas porque equivocadamente se consideran volúmenes de almacenamiento que en realidad ya fueron llenados parcialmente con los azolves de sedimento que se han acumulado a través del tiempo.

La cuenca del Curso Alto del río Lerma comprende la vertiente norte de la sierra Nahuatlaca-Matlatzinca, así como la vertiente nororiental del Nevado de Toluca. En esta área queda contemplado el altiplano más meridional de la cuenca con 2,580 msnm. Aproximadamente 9 km aguas abajo del embalse José Antonio Alzate, y a una altitud de 2,570 msnm, termina el curso alto al descender el escalonamiento tectónico del Valle de Ixtlahuaca (Díaz-Delgado *et al.*, 1999) (Fig.1).

En este trabajo se analizó la acumulación de sedimentos que se presenta en dicho embalse el cual retiene el sedimento de la erosión de la cuenca del Curso Alto del río Lerma (CARL),

la cual se encuentra altamente urbanizada, con una población estimada de 1.5 millones de habitantes y un polo industrial importante con más de 2000 empresas. Este cuerpo de agua recibe aguas residuales domésticas e industriales, por ello se han realizado diversos estudios sobre la calidad de su agua y sedimentos (Barceló-Quintal, 2000; Ávila-Pérez, 2001). Igualmente, se pretendió relacionar los aspectos hidrosedimentológicos con los parámetros de contaminación por metales pesados de los sedimentos de fondo con el objetivo de sugerir acciones urgentes que mitiguen la pérdida de funcionalidad del embalse.

MATERIALES Y MÉTODOS

Una primera etapa comprendió el análisis de los caudales influentes al embalse. La información de las estaciones hidrométricas que se utilizaron en el estudio (La Y, Las Trojes y Calixtlahuaca) (Fig. 1) registran sólo parcialmente los caudales de las subcuencas que contribuyen directamente al volumen de agua que llega al embalse. Además de éstas existe un área de drenaje perteneciente a la cuenca que no cuenta con estaciones de aforo. Por tal razón, teniendo en consideración las características fisiográficas y el régimen pluviométrico de las zonas no aforadas, se procedió a la estimación de los caudales sin registro hidrométrico por la técnica de ponderación hidrológica de regiones homogéneas, que consiste en incrementar el valor del caudal registrado, en una o más estaciones de aforo, aguas arriba del punto donde se desea estimar el valor de caudal utilizando

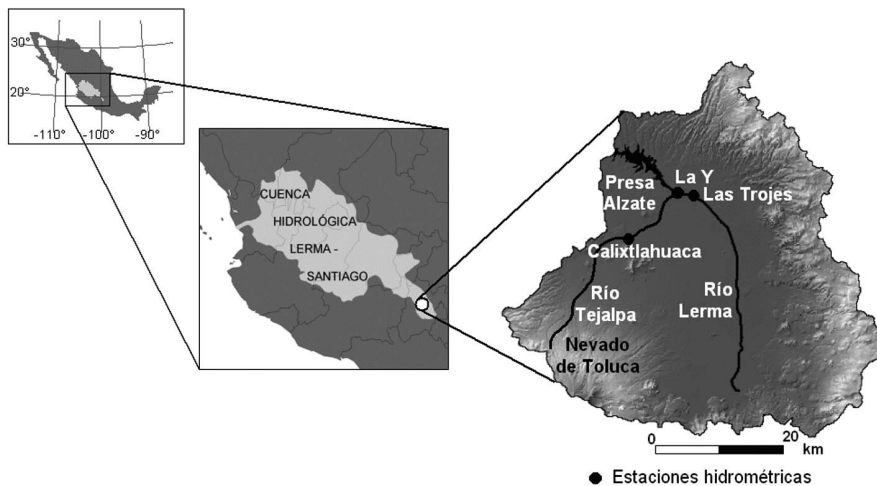


Figura 1. La cuenca del CARL en el contexto nacional y localización de la presa Alzate (Gómez-Albores, 2005).

la proporción de superficies drenadas. Es decir, se multiplica el resultado de la relación de superficies hidrológicamente homogéneas por el valor del caudal registrado aguas arriba, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{total_estimado}} = \left[\frac{S_{\text{total_homogénea}}}{S_{\text{homogénea_aguas_arriba}}} \right] Q_{\text{aguas_arriba}}$$

En el caso del CARL, se consideró que la superficie no aforada del margen derecho debía ser ponderada con la información correspondiente a la subcuenca adyacente y que la superficie no aforada del margen izquierdo debía ser ponderada con el empleo de los registros de caudal de la suma de las dos estaciones de aforo aguas arriba; es decir, las estaciones del río Tejalpa y del río Lerma en La Y.

Posteriormente se efectuó un estudio de azolve del embalse por medio de mediciones de campo, que se describe en las secciones siguientes y donde se explica, igualmente, el análisis de metales pesados en sedimentos de fondo para determinar si existía, o no, riesgo para su posible remoción y disposición.

Determinación del azolve de sedimentos del embalse.

Debido a los significativos aportes de sedimentos en suspensión presentes en el río Lerma, mismos que pueden ser observados a simple vista, se realizó un estudio batimétrico de la morfología del fondo actual del embalse Alzate efectuado con una estación total de topografía durante el periodo de abril a junio de 2004, cuando éste se encontraba en sus niveles más bajos. La cuadrilla topográfica que realizó la batimetría utilizó la técnica de la poligonal abierta geográficamente referenciada y la toma de puntos aleatorios que cubrieran satisfactoriamente todo el cuerpo del mismo. Para cubrir correctamente todas las zonas, en las partes en donde aún se encontraba agua fue necesario utilizar embarcaciones pequeñas.

Para el análisis también se contó con la topografía original del año 1959 utilizada para la definición del sitio de construcción de la cortina del embalse Alzate. El análisis de los conjuntos de información batimétrica se realizó con el paquete de sistema de información geográfica (SIG) Idrisi (Eastman, 2003). El plano topográfico de 1959 a escala 1:20 000 fue digitalizado y procesado en el sistema de información geográfica Idrisi con la finalidad de obtener las curvas de capacidad de almacenamiento versus los niveles de inundación y del área inundada versus la elevación del nivel de agua.

La batimetría actual fue directamente estimada por interpolación lineal con base en las curvas de nivel obtenidas por la cuadrilla de ingenieros que realizó el trabajo de campo.

Fue necesario llevar a cabo un arduo trabajo de georeferenciación y de acoplamiento de capas entre las dos temporalidades de información batimétrica porque el primer plano no contaba con coordenadas geográficas, sino geométricas, el cual fue realizado con el paquete IDRISI con base en el proceso de

remuestreo y considerando la esperanza matemática de la ubicación del cuerpo del embalse en función de los ejes principales de los rasgos morfológicos de las dos batimetrías disponibles, además se consideró la cartografía digital del INEGI (1970) con escala 1:50000 y una imagen de satélite del embalse del año 2000. Es importante mencionar que en el proceso de remuestreo se realiza una restauración geométrica de las imágenes, especialmente en el caso de las imágenes captadas por sensores remotos, las cuales en su estado original, se encuentran sin coordenadas reales. El remuestreo se utiliza para georegistrar una imagen o archivo vectorial en un sistema de referencia o en otro archivo. Así pues, esta operación utiliza las coordenadas de una serie de puntos de control en un archivo existente y en el nuevo sistema de referencia deseado convirtiendo el archivo al nuevo sistema de referencia por medio de una función cartográfica polinomial lineal, cuadrática o cúbica. En el caso de imágenes satelitales, es suficiente un remuestreo simple lineal en la mayoría de las instancias. Con las imágenes teselares, las celdas de la nueva retícula rara vez coinciden de forma alguna con la retícula original. Por lo tanto, los nuevos valores de las celdas se estiman al remuestrear la retícula anterior (Eastman, 2003).

Muestreo de sedimentos. Para llevar a cabo el análisis de la concentración de metales pesados en el lecho del embalse se seleccionaron estratégicamente un conjunto de 10 zonas de muestreo (numeradas del 1 al 10), ubicadas en diferentes sitios del embalse Alzate considerando la dirección del flujo de agua (Fig. 2). La selección de las zonas de muestreo de sedimento se basó en trabajos previos, los cuales indican las zonas de acumulación significativa (Barceló-Quintal, 2000; Ávila-Pérez *et al.*, 1999) y fueron también considerados aspectos de accesibilidad y cobertura espacial. Las muestras de sedimento se colectaron con ayuda de una draga de acero inoxidable tipo Ponar. Aproximadamente 5 kg de sedimento fueron extraídos de la parte media de la draga, colocados en bolsas de polietileno y mantenidos a 4°C durante su transporte al laboratorio donde fueron secados en contenedores de plástico en una estufa a 50°C por 48 h.

Tratamiento y análisis de metales en los sedimentos. Las fracciones de sedimento fueron separadas a través de un proceso de tamizado, las retenidas mediante los tamices números 50 ($\Phi 50=0.297$ mm), 100 ($\Phi 100=0.149$ mm), 200 ($\Phi 200=0.073$ mm), 400 ($\Phi 400=0.037$ mm) y la menor a 400 fueron molidas en un mortero de ágata y homogeneizadas en una mezcladora automática por 30 minutos. Posteriormente se prepararon pastillas de 3.1 cm de diámetro usando 2 g de muestra y aplicando una presión de 5 toneladas durante 1 minuto (Rodríguez & Ávila-Pérez, 1997), las cuales se analizaron por triplicado mediante la técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X Dispersiva en Energía (Bertini, 1970). Dicha técnica consta de un detector de Si-Li y de un preamplificador integrado con una resolución en energía de 185 eV, medida en función de la máxima amplitud del pico a una

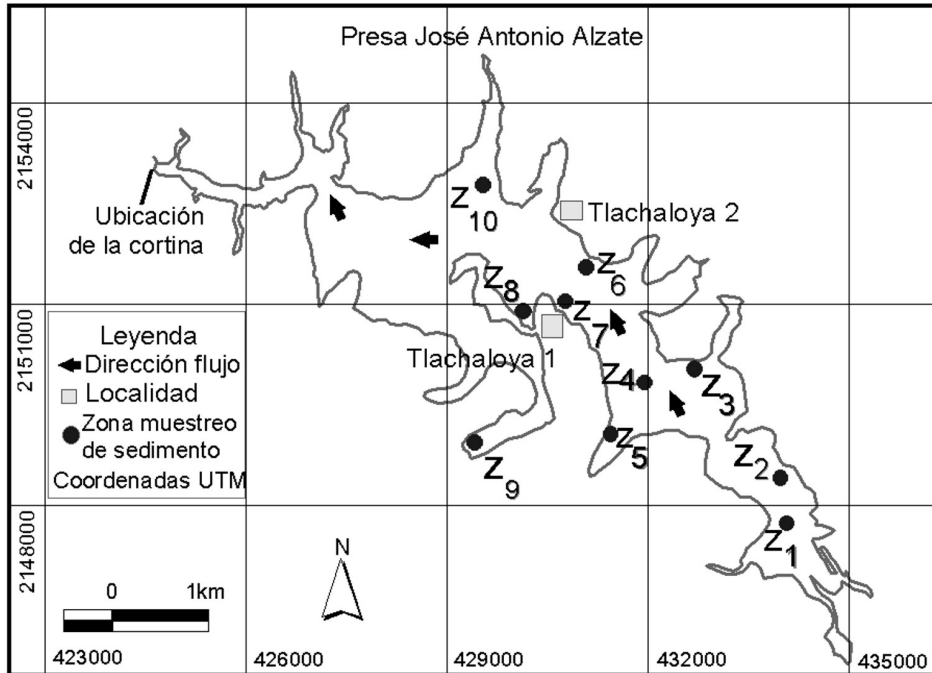


Figura 2. Mapa de ubicación de las zonas de muestreo.

altura media (Full Width at Half Maximum, FWHM) a una energía de 5.9 KeV. Como sistema de excitación se utilizaron dos fuentes radiactivas de ²³⁸Pu con una energía 13.612 KeV y un tiempo de conteo de 1,000 s (Ávila-Pérez *et al.*, 1999). Las áreas de cada elemento fueron obtenidas mediante el programa AXIL (van Espen *et al.*, 1993) y la concentración de cada metal fue determinada con el programa SAX (Valdés & Jaramillo, 1994) utilizando el método de corrección por compton (Ávila-Pérez & Zarazúa-Ortega, 1993). Todos los elementos se cuantificaron por medio de una curva de estándar externo. Con el objeto de garantizar los resultados analíticos en este trabajo, se analizaron los metales de interés en los materiales certificados de referencia CRM-277 y Soil-7, los cuales presentaron una variación entre el valor medido y el valor de referencia menor al 10% procesándolos mediante el programa SAX (Valdés & Jaramillo, 1994) con objeto de obtener la media, la desviación estándar y el intervalo de confianza. Para los diferentes métodos estadísticos utilizados se consideró un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$).

Factores de enriquecimiento. Con el objeto de determinar las contribuciones naturales y antropogénicas de los elementos en los sedimentos del embalse Alzate, se determinaron los factores de enriquecimiento. El cálculo de los factores se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación (Lawson & Winchester, 1979; Poissant *et al.*, 1994):

Donde:

FE: Factor de enriquecimiento del elemento analizado (adimensional)

$$FE = \frac{\left[\begin{array}{c} CA \\ \text{muestra} \\ CB \\ \text{muestra} \end{array} \right]}{\left[\begin{array}{c} AXS \\ ARS \end{array} \right]}$$

CA_{muestra}: Concentración del elemento X en la muestra (mg/kg).

CR_{muestra}: Concentración del elemento de referencia en la muestra (mg/kg).

AXS: Abundancia del elemento X en sedimentos derivados de rocas ígneas (mg/kg).

ARS: Abundancia del elemento de referencia (Ti) en sedimentos derivados de rocas ígneas (mg/kg).

Como elemento de referencia en el embalse se utilizó al Ti, debido a que es un elemento típicamente conservativo (Bowen, 1979; Dekov *et al.*, 1998) y porque en otros trabajos han determinado que dicho elemento tiene un origen mayoritariamente natural en el embalse (Ávila-Pérez, 1995; Ávila-Pérez *et al.*, 1999; Barceló-Quintal, 2000). Los valores de referencia de la composición típica de un sedimento derivado de una roca ígnea (Mason & Moore, 1982) sobre el contenido de los metales considerados en este tra-

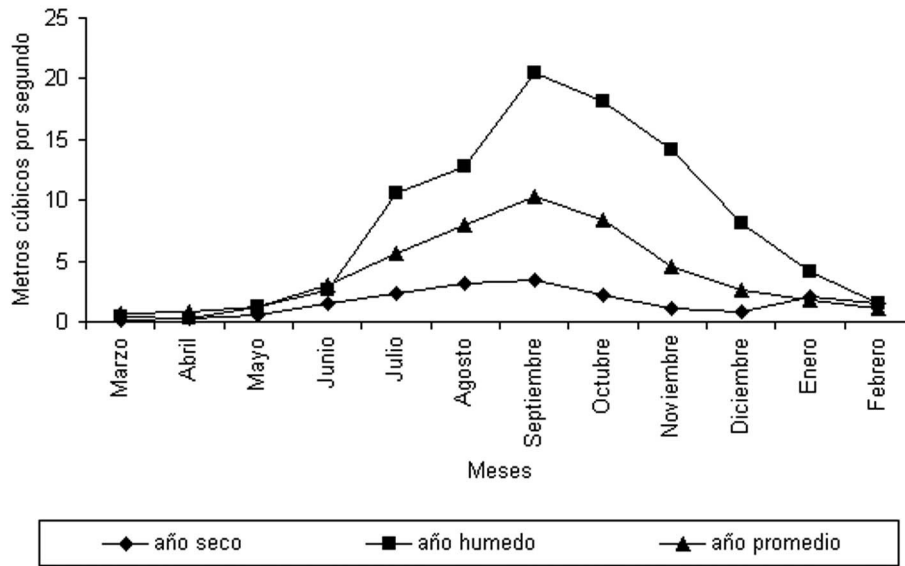


Figura 3. Hidrograma promedio interanual, año seco y año húmedo de la estación: Cortina de la presa José Antonio Alzate.

bajo son: Mn (950 mg/kg), Fe (50 000 mg/kg), Cu (55 mg/kg), Zn (70 mg/kg), Pb (13 mg/kg) y Ti (4 400 mg/kg).

$$Q_{\text{diario CARL}} = 2.19 (Q_{\text{diario Trojes}}) + 1.082 (Q_{\text{diario La Y}} + Q_{\text{diario Calixtlahuaca}})$$

RESULTADOS

En la figura 3 se presentan los hidrogramas promedio interanual de caudales ponderados hasta la cortina del embalse Alzate. El coeficiente de ponderación para los caudales de la estación las Trojes fue de 2.19 y para la suma de caudales de las estaciones La Y y Calixtlahuaca fue de 1.082, tal como se muestra en la expresión siguiente (Hunt *et al.*, 2002).

Una vez que se logró el acoplamiento de las dos batimetrías del embalse se llevó a cabo la estimación de las curvas de capacidad de almacenamiento vs niveles de agua (Fig. 4) y área inundada vs elevación del agua (Fig. 5).

Posteriormente se realizó una sustracción matricial entre las dos capas batimétricas para obtener la columna de sedimentos acumulados para todos los puntos circunscritos en el embalse (Fig. 6). Con los resultados, se construyó la tabla 1 que resume las características originales y actuales del embalse. Los datos demuestran una reducción significativa del volumen

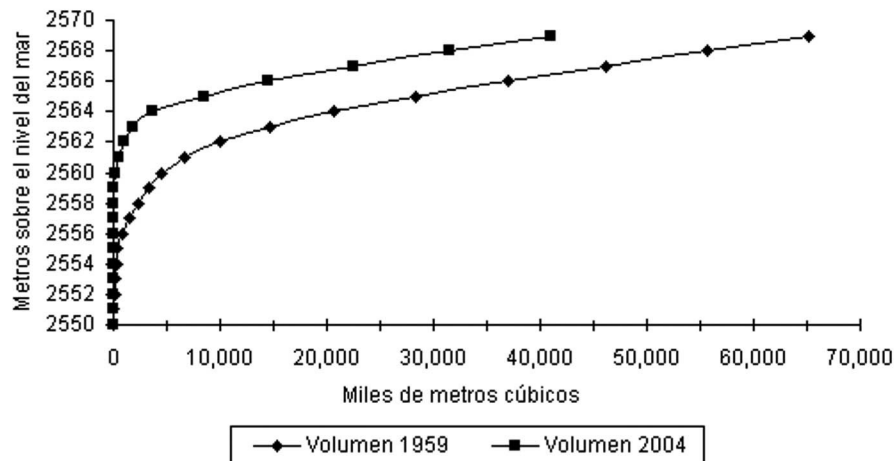


Figura 4. Curvas de capacidad de almacenamiento del embalse Alzate para 1959 y 2004.

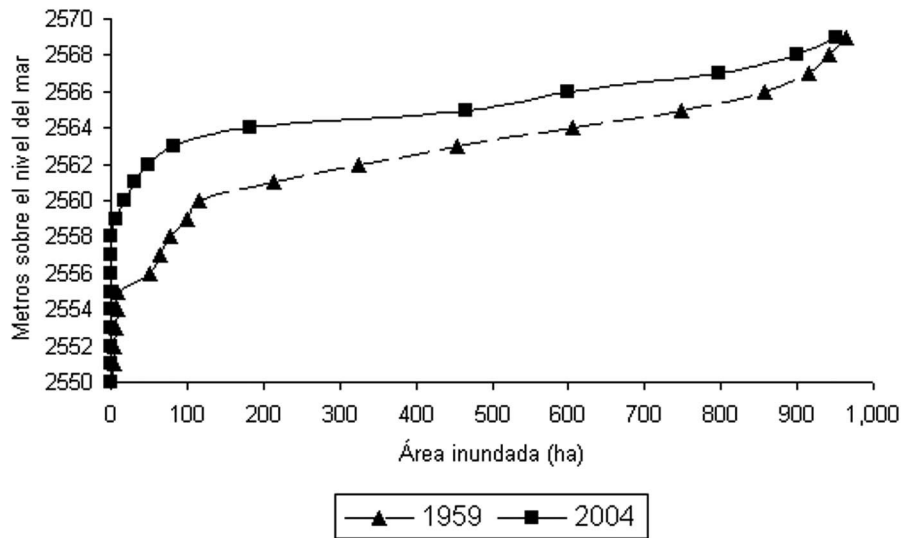


Figura 5. Curva área inundada – elevación del nivel de agua para 1959 y 2004.

regulador del embalse lo cual le impide cumplir adecuadamente sus funciones de control de inundaciones y suministro de agua para riego aguas abajo. Para cuantificar esa deficiencia se compararon los volúmenes de salida del embalse estimados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) con base en la capacidad original del embalse (Fig. 7) y los volúmenes actuales de acuerdo con la curva de capacidad revisada (Fig.8). Se comprobó que para los meses críticos de irrigación comprendidos entre marzo y julio actualmente el embalse no alcanza a suministrar en un año promedio los 70.7 hm³ que se estimaban con la curva de capacidad original sino tan sólo 47.3 hm³, es decir 23.4 hm³ menos de lo previsto tal como se presenta en la tabla 2.

Por otro lado, la tabla 3 muestra la concentración en mg/kg de Fe, Cu, Zn, Ti, Mn y Pb en las diferentes zonas del cuerpo de

agua. Los resultados mostraron una considerable variación en la concentración de tales elementos en las diferentes zonas del embalse. La mayor concentración de Cu se encontró en las zonas 5 y 8 y los mayores niveles de Zn y Pb en las zonas 2 y 6, ambos en la fracción más fina del azolve. El Fe, Mn y Ti presentan las mayores concentraciones en la zona 2 en las fracciones de tamaño de grano intermedio.

DISCUSIÓN

De acuerdo con la tabla 1 a nivel de la obra de toma 2558.3 msnm, prácticamente no hay capacidad de almacenamiento y la distribución de las capas de sedimento acumulado (Fig. 6) indican que las columnas de azolve (más de 6 m) en esa zona ya están

Tabla 1. Características del embalse Alzate originales (1959) y actuales.

Característica	Dato	Área inundada (ha)	Volumen de diseño (hm ³)	Volumen estimado con uso del SIG (hm ³)	
				1959	2004
Elevación corona de la cortina	2568.50 (msnm)				
Elevación aguas máximas	2566.92 (msnm)	1423.00	49.00	46.33	25.14
Elevación cresta del vertedor	2565.50 (msnm)	1049.00	35.30	32.63	11.44
Longitud del vertedor	282.00 (m)				
Gasto máximo normal en el vertedor	254.00 (m ³ /s)				
Elevación umbral obra de toma	2558.30 (msnm)	290.00	8.00	6.69	0.56
Gasto máximo normal obra de toma	20.00 (m ³ /s)				

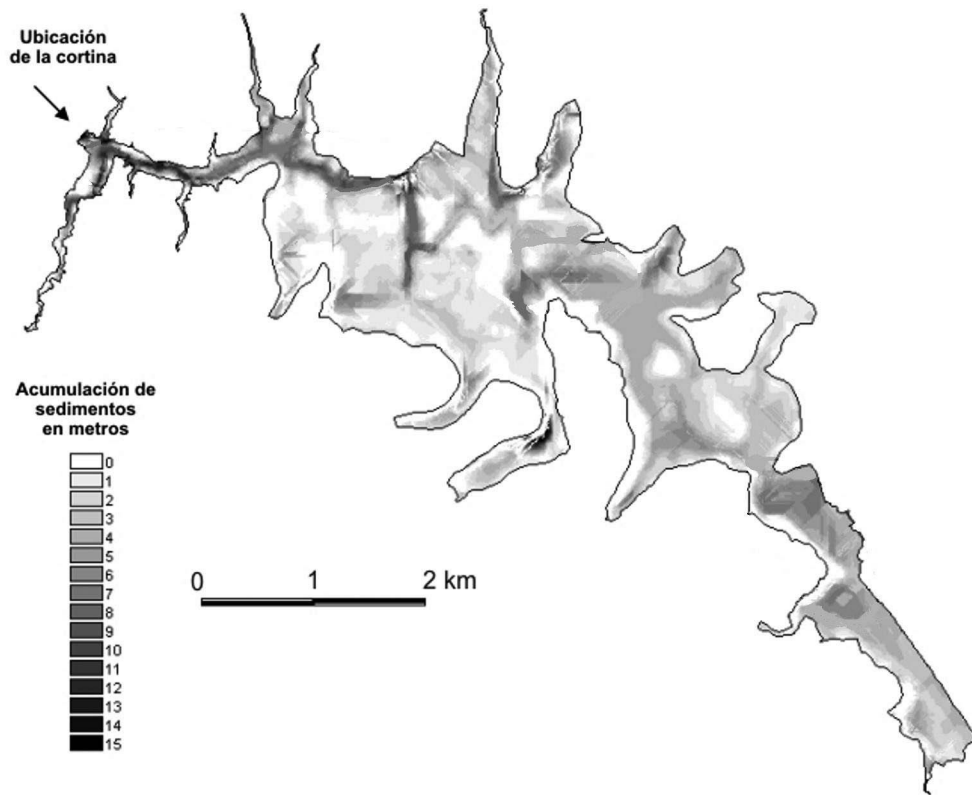


Figura 6. Acumulación de sedimentos en el embalse Alzate hasta el año 2004.

cerca del umbral de la obra de toma (debe observarse que el fondo del embalse cerca de la cortina tiene la cota de 2550 msnm). Esto representa una amenaza para la operación de la estructura, la que es la que garantiza que el embalse pueda cumplir con su función de suministro de agua para irrigación y control de avenidas aguas abajo. Para evitar la obstrucción de la obra de toma habría que dragar, hasta una distancia de 150 m de la cortina del embalse, un volumen total de sedimentos de 65 000 m³. Sin embar-

go, este valor no parece excesivo en vista de los beneficios que implica mantener un adecuado funcionamiento de la estructura.

La mayor concentración de Cu fue detectada en los brazos del embalse (zonas 5 y 8), las mayores concentraciones de Zn y Pb en la entrada del embalse (zona 2) y entre los poblados de Tlachaloya 1 y Tlachaloya 2 (zona 6). La disminución en la concentración de Zn y Pb desde la entrada hasta la salida del embal-

Tabla 2. Salidas estimadas en año hidrológico promedio del embalse Alzate (hm³)

Mes	Volumen batimetría 2004	Volumen batimetría 1959	Diferencia acumulada marzo-julio
Enero	5.1	2.1	
Febrero	5.7	5.3	
Marzo	5.9	8.3	-2.4
Abril	3.9	8.8	-7.3
Mayo	5.5	7.7	-9.5
Junio	12.0	18.3	-15.8
Julio	20.0	27.6	-23.4
Agosto	26.9	29.6	
Septiembre	23.5	17.8	
Octubre	20.1	3.4	

Tabla 3. Concentración en mg/kg de metales en distintas fracciones del sedimento.

	Malla	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Zona 1	50	3940 ± 158	710 ± 36	39045 ± 1562	39 ± 6	157 ± 14	13 ± 3
	100	4703 ± 188	684 ± 41	35852 ± 1434	34 ± 5	108 ± 11	8 ± 2
	200	4358 ± 174	672 ± 40	35782 ± 1431	40 ± 6	105 ± 11	6 ± 2
	400	4923 ± 197	704 ± 35	37696 ± 1508	40 ± 6	135 ± 14	12 ± 2
	<400	4129 ± 165	656 ± 39	35272 ± 1411	73 ± 10	151 ± 14	13 ± 3
Zona 2	50	6392 ± 256	646 ± 39	39517 ± 1581	39 ± 6	120 ± 12	7 ± 2
	100	6061 ± 242	648 ± 39	39342 ± 1574	32 ± 5	127 ± 13	7 ± 2
	200	14676 ± 587	928 ± 37	61942 ± 2478	41 ± 7	171 ± 14	8 ± 2
	400	16766 ± 671	845 ± 42	65566 ± 2478	57 ± 8	222 ± 18	14 ± 3
	<400	6239 ± 250	551 ± 33	41815 ± 1763	94 ± 12	283 ± 23	18 ± 4
Zona 3	50	3884 ± 155	439 ± 26	27952 ± 1118	40 ± 6	102 ± 10	8 ± 2
	100	7881 ± 315	686 ± 41	43129 ± 1725	45 ± 7	131 ± 13	8 ± 2
	200	3934 ± 157	530 ± 32	28860 ± 1154	27 ± 4	95 ± 11	6 ± 2
	400	4049 ± 162	556 ± 33	32902 ± 1316	26 ± 4	87 ± 10	6 ± 2
	<400	4307 ± 172	507 ± 30	33677 ± 1347	105 ± 14	169 ± 14	12 ± 2
Zona 4	50	4706 ± 188	738 ± 37	37500 ± 1500	33 ± 5	117 ± 12	11 ± 2
	100	4270 ± 171	661 ± 40	36535 ± 1461	36 ± 6	104 ± 10	10 ± 2
	200	4504 ± 180	583 ± 35	36382 ± 1455	33 ± 5	103 ± 10	8 ± 2
	400	5773 ± 231	600 ± 36	39641 ± 1586	43 ± 7	111 ± 11	7 ± 2
	<400	5313 ± 213	583 ± 35	40439 ± 1618	86 ± 11	140 ± 13	12 ± 2
Zona 5	50	4547 ± 182	377 ± 23	37212 ± 1488	39 ± 6	122 ± 12	12 ± 2
	100	5029 ± 201	340 ± 20	37729 ± 1509	46 ± 7	120 ± 12	9 ± 2
	200	5595 ± 224	349 ± 21	38073 ± 1523	49 ± 8	116 ± 12	10 ± 2
	400	4897 ± 196	351 ± 21	37853 ± 1514	78 ± 10	127 ± 13	12 ± 2
	<400	3999 ± 160	238 ± 17	38775 ± 1551	140 ± 17	168 ± 13	14 ± 3
Zona 6	50	3821 ± 153	464 ± 28	28865 ± 1155	41 ± 7	97 ± 12	11 ± 2
	100	7088 ± 284	833 ± 42	40726 ± 1629	53 ± 8	135 ± 14	8 ± 2
	200	3680 ± 147	493 ± 30	29543 ± 1182	29 ± 5	92 ± 11	11 ± 2
	400	4270 ± 171	495 ± 30	28719 ± 1149	43 ± 7	96 ± 12	11 ± 2
	<400	4344 ± 174	837 ± 42	39045 ± 1562	121 ± 15	219 ± 18	17 ± 3
Zona 7	50	5677 ± 227	496 ± 30	46655 ± 1866	72 ± 11	145 ± 13	9 ± 2
	100	4667 ± 187	544 ± 33	38231 ± 1529	36 ± 6	99 ± 12	6 ± 2
	200	8126 ± 325	486 ± 29	44792 ± 1792	46 ± 7	109 ± 11	8 ± 2
	400	4070 ± 163	440 ± 26	34595 ± 1384	46 ± 7	105 ± 11	6 ± 2
	<400	4567 ± 183	477 ± 29	42150 ± 1686	125 ± 15	175 ± 14	10 ± 2
Zona 8	50	4118 ± 165	571 ± 34	38825 ± 1553	31 ± 5	72 ± 9	3 ± 1

	100	4113 ± 165	498 ± 30	36431 ± 1457	27 ± 5	73 ± 9	5 ± 2
	200	4539 ± 182	479 ± 29	36278 ± 1451	22 ± 4	75 ± 9	3 ± 1
	400	4791 ± 192	474 ± 28	38505 ± 1540	42 ± 7	83 ± 10	5 ± 2
	<400	4344 ± 174	483 ± 28	38683 ± 1547	137 ± 16	123 ± 12	6 ± 2
Zona 9	50	3584 ± 143	464 ± 28	26560 ± 1062	32 ± 5	86 ± 9	10 ± 2
	100	3438 ± 138	552 ± 33	26915 ± 1077	35 ± 6	83 ± 8	9 ± 2
	200	3879 ± 155	530 ± 32	27306 ± 1092	25 ± 4	97 ± 10	9 ± 2
	400	3737 ± 149	511 ± 31	27707 ± 1108	38 ± 6	103 ± 9	10 ± 2
	<400	3428 ± 137	522 ± 31	28353 ± 1134	78 ± 12	132 ± 11	12 ± 2
Zona 10	50	4030 ± 161	251 ± 18	26479 ± 1059	37 ± 6	78 ± 8	9 ± 2
	100	4181 ± 167	274 ± 19	27190 ± 1088	33 ± 5	80 ± 8	10 ± 2
	200	4972 ± 199	266 ± 19	27052 ± 1082	30 ± 5	75 ± 8	11 ± 2
	400	4183 ± 167	255 ± 18	26576 ± 1063	60 ± 10	90 ± 9	12 ± 2
	<400	3551 ± 142	229 ± 16	26100 ± 1044	105 ± 13	111 ± 11	13 ± 3

se ha sido analizada y discutida con mayor detalle en el trabajo de Ávila-Pérez *et al.* (1999). Sin embargo, es importante señalar que la concentración relativamente alta de Zn y Pb de la zona 6 puede estar asociada con el tráfico de lanchas de motor de gasolina y con las descargas de agua residual doméstica de los habitantes de Tlachaloya (Barceló-Quintal, 2000; Ávila-Pérez, 2001).

Las mayores concentraciones de zinc y plomo se obtuvieron en las zonas de deposición de finos, lo cual puede estar

relacionado con las contribuciones naturales de rocas y suelos de la cuenca o con las prácticas de agricultura de las áreas aledañas al embalse que incrementan la concentración de esos metales en las zonas menos influenciadas por las condiciones hidrodinámicas dominantes de deposición en el cuerpo de agua (Barceló-Quintal, 2000).

Según estudios previos, sobre todo en épocas de lluvias y en la entrada del embalse, existen contribuciones importantes de materia suspendida en el agua producto de la erosión de suelos

Tabla 4. Factores de enriquecimiento para los metales pesados del sedimento de la presa Alzate.

ZONA	Elemento y número de malla utilizado									
	Mn		Fe		Cu		Zn		Pb	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0.72	0.74	0.73	0.75	0.68	1.42	1.76	2.30	0.76	1.09
2	0.32	0.41	0.41	0.59	0.76	1.21	0.92	2.85	0.28	1.09
3	0.52	0.55	0.59	0.69	0.55	1.95	1.32	2.47	0.49	0.96
4	0.62	0.51	0.69	0.67	0.60	1.29	1.42	1.66	0.64	0.78
5	0.33	0.28	0.66	0.85	0.84	2.80	1.52	2.64	0.76	1.21
6	0.56	0.89	0.60	0.79	0.71	2.23	1.40	3.17	0.73	1.35
7	0.40	0.48	0.64	0.81	0.71	2.19	1.28	2.41	0.43	0.76
8	0.53	0.51	0.75	0.78	0.56	2.52	1.09	1.78	0.31	0.47
9	0.65	0.71	0.65	0.73	0.72	1.82	1.58	2.42	0.85	1.20
10	0.28	0.30	0.54	0.65	0.74	2.37	1.16	1.97	0.87	1.26
Promedio	0.49	0.54	0.63	0.73	0.69	1.98	1.35	2.37	0.61	1.02

A: Sedimento comprendido entre mallas número 50 y 400, B: Sedimento de tamaño menor a malla número 400.

de la cuenca (Tejeda *et al.*, 2006). Vaca (1996) y Balderas (1998) reportaron para esta región la presencia de rocas formadas por derrames piroclásticos y en menor proporción por derrames continentales, representadas por andesitas, basaltos, lahares, y pequeños lentes de materiales aluviales. Los suelos que predominan son el andosol, que sustenta la vegetación de los bosques

templados, litosol que sostiene matorrales, histosoles en áreas inundables, feozem que domina parte del valle y vertisoles, de buen uso agrícola, alrededor del embalse Alzate. Las concentraciones promedio reportadas para suelos de la cuenca son: Zn = 53 mg/kg, Ni = 40 mg/kg, Cu = 19 mg/kg, Cr = 27 mg/kg y Pb = 67 mg/kg (Vaca, 1996; Balderas, 1998).

Tabla 5. Concentración máxima autorizada por agencias internacionales para uso agrícola de sedimentos en mg/kg.

Metal	Francia	Canadá-Ontario	US-EPA
Cobre	1500	17000	410
Zinc	3000	4200	678
Plomo	300	1100	45

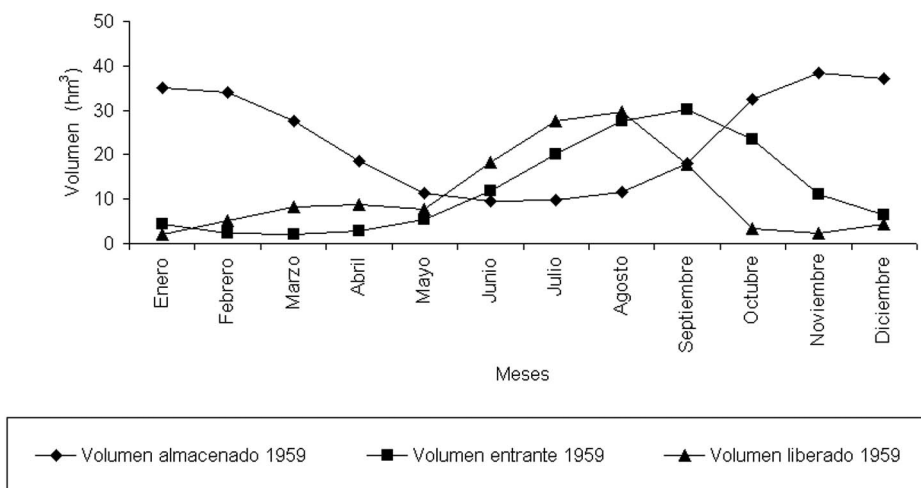


Figura 7. Estadísticas multianuales de operación del embalse Alzate bajo el empleo de la curvas para 1959: área inundada-elevación del nivel de agua y capacidad de almacenamiento-elevación del nivel de agua.

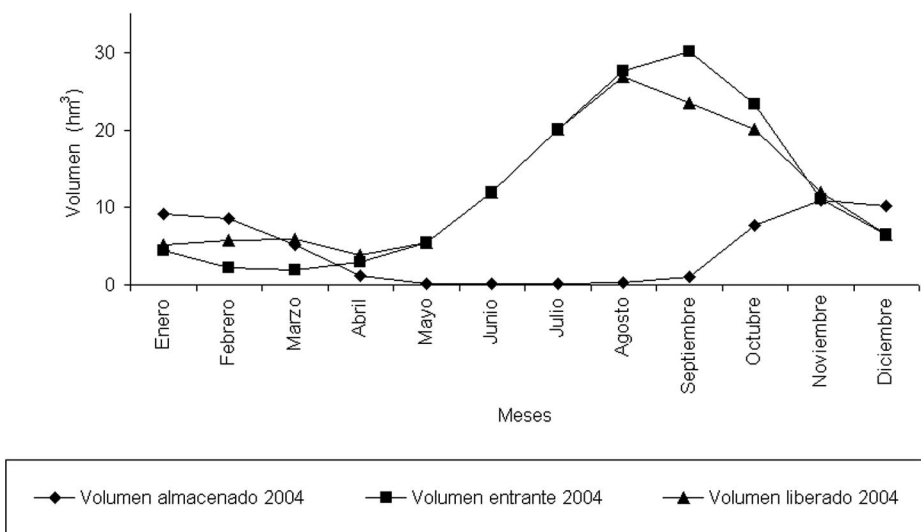


Figura 8. Estadísticas multianuales de operación del embalse Alzate bajo el empleo de la curvas para 2004: área inundada-elevación del nivel de agua y capacidad de almacenamiento-elevación del nivel de agua.

La fluctuación en el contenido elemental de los sedimentos a través del embalse (zonas 1-10, Tabla 3) puede indicar una variabilidad natural y/o una contribución antropogénica. Ciertamente, son necesarios más estudios para clarificar si es una variable natural o antropogénica y estimar sus contribuciones relativas. Sin embargo, con base en trabajos previos (Rodríguez & Ávila-Pérez, 1997; Ávila-Pérez *et al.*, 1999; Barceló-Quintal *et al.*, 2001), es posible considerar en el caso de Cu, Zn y Pb, que el impacto humano es mayor al natural en el proceso de formación y distribución de los sedimentos.

Los resultados obtenidos de los cálculos de los factores de enriquecimiento (FE) se muestran en la tabla 4. Estos valores, indican que la mayoría de los elementos, no demostraron enriquecimientos por contribuciones naturales y antropogénicas a los sedimentos del embalse Alzate; únicamente el Cu y el Zn en la fracción menor a malla 400 presentaron un FE promedio ligeramente alto (Cu = 1.98 y Zn = 2.37), mientras que todos los metales para el material retenido en las mallas 50 a 400 presentaron, en promedio, FE bajos (Mn = 0.49, Fe = 0.63, Cu = 0.69, Zn = 1.35, Pb = 0.61).

Los elementos con los mayores valores de FE, de manera individual, fueron: Cu = 2.80, 2.52 y 2.37 y el Zn = 3.17, 2.85 y 2.64, ambos en la malla menor a 400. Lo anterior permite concluir que para el caso de los metales Cu y Zn, existe alguna contribución por fuentes naturales y/o antropogénicas hacia el embalse.

Evaluación del grado de contaminación por metales pesados. Para evaluar el grado de contaminación de los sedimentos por Cu y Zn, elementos para los cuales se obtuvieron los factores de enriquecimiento más altos, se compararon los valores obtenidos con los de algunas normas de agencias internacionales para el uso de sedimentos en actividades agrícolas. Se consideraron la norma francesa AFNOR U44-041 (Bussy, 1996), la norma canadiense (Webber, 1988) y la de Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 2000).

Al comparar los valores de las tablas 3 y 5 se pudo comprobar que para ningún diámetro analizado se sobrepasan los valores de las normas de sedimentos dragados para uso agrícola para Cu, Zn y Pb, lo cual permite su eventual uso en suelos agrícolas de la cuenca.

Así pues, a través del presente estudio se comprobó con mediciones de terreno que ha ocurrido una reducción altamente significativa, cerca del 50%, del volumen útil del embalse Alzate durante la operación de tan sólo 42 años.

Los resultados ponen en entredicho la política de gestión de los volúmenes de agua del embalse Alzate, ya que su estimación es inapropiada y actualmente se distribuye a los distritos de riego 23.4 hm³ menos de lo estimado originalmente para los meses de mayor demanda, es decir, durante el período marzo-julio.

Con relación a la contaminación por metales pesados en los sedimentos, se puede concluir que sólo se presenta un posible riesgo de contaminación por Cu y Zn, pero no es significativo y los sedimentos podrían utilizarse para uso agrícola según las normas, francesas, canadienses y de Estados Unidos de Norteamérica. Por otro lado, se sugiere un estudio complementario de las condiciones vigentes de contaminación de tipo orgánico de los sedimentos por dragar y del costo del dragado.

Finalmente, desde el punto de vista hidrológico-hidráulico, se recomienda una labor de dragado de la zona aledaña a la obra de toma del embalse para evitar que la acumulación de sedimentos pueda afectar la operación de esta estructura, la cual es vital para el cumplimiento de las funciones de control de avenidas y seguridad del embalse José Antonio Alzate.

REFERENCIAS

- ÁVILA -PÉREZ, P., M. BALCÁZAR, G. ZARAZÚA-ORTEGA, I. BARCELÓ-QUINTAL & C. DÍAZ-DELGADO. 1999. Heavy metal concentrations in water and bottom sediments of a Mexican reservoir. *The Science of the Total Environment* 234(1):185-196.
- ÁVILA-PÉREZ, P. & G. ZARAZÚA-ORTEGA. 1993. Concentración de metales pesados ostiones (*Crassostrea virginica*) del Canal El Chijol, Ver., México, *International Journal of Environmental Pollution* 9(2): 53-64.
- ÁVILA-PÉREZ, P. 2001. Dinámica de metales pesados no esenciales en la interacción agua-sedimento-biota de la presa J. A. Alzate. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. 245 p.
- ÁVILA-PÉREZ, P. 1995. Evaluación de los metales pesados Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb y Hg en agua, sedimento y lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) de la presa José Antonio Alzate, Estado de México. Tesis de Maestría en Ecología. Universidad Autónoma del Estado de México. 155 p.
- BALDERAS, P. M. A. 1998. Caracterización de metales pesados en suelos irrigados en la Cuenca Alta del Río Lerma. Tesis de Licenciatura en Ciencias. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma del Estado de México. 53 p.
- BARCELÓ-QUINTAL, I., C. SOLÍS, C.C. GONZÁLEZ, P. ÁVILA-PÉREZ & J. A. GARCÍA. 2001. Determination of cadmium and lead species in the water column of the Jose Antonio Alzate Reservoir, Mexico. *Water Environment Research*, 72 (2): 132-140.
- BARCELÓ-QUINTAL, I. 2000. Estudio de la movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México. Tesis de Doctorado. Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. 320 p.
- BERTINI, B. P. 1970. *Principles and practice of X-Ray Spectrometry Analysis*. Plenum Ed., New York. 1059 p.

- BOWEN, H. J. M. 1979. *Environmental Chemistry of Elements*. Academic Press Ed. London. 252 p.
- BUSSY, A.L. 1996. *Mobilité des métaux dans un système fluvial urbain*. Tesis de Doctorado, Universidad Paris XII-Val de Marne. París, Francia, 200 p.
- DEKOV, V. M., F. ARAUJO, R. VAN GRIEKEN & V. SUBRAMANIAN. 1998. Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers (India). *The Science of the Total Environment* 212 (1): 89-105.
- DÍAZ-DELGADO, C., K. M. BÂ, A. ITURBE, M.V. ESTELLER & F. REYNA. 1999. Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: caso del curso alto del río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum* 6 (2): 124-134 pp.
- EASTMAN, J. R. 2003. IDRISI Kilimanjaro. *Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Clark Labs, Clark University, Worcester, Massachusetts, Estados Unidos. Editor de la traducción: Dr. Andrés C. Ravelo, CREAN, CONICET, Fac. de Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 250 p.
- EPA (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY) 2000. *Further Revisions to the Clean Water Act for Discharge of Dredged Material*. Volume 65, Number 159: 65-67 pp.
- GÓMEZ-ALBORES, M.A. 2005. Desarrollo de una metodología geomática para la evaluación por subcuenca de indicadores de deficiencias en tratamiento de aguas residuales. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México, México, 155 p.
- HUNT, J.R., G. PROCTOR, J.A. GARCÍA, C. DÍAZ-DELGADO, M.C. JIMÉNEZ, S. GARRIDO, R. REYES, P. MORALES, P. ÁVILA-PÉREZ, L. TÁVERA, E. QUINTERO, S, TEJEDA, A. LÓPEZ & G. ZARAZÚA-ORTEGA. 2002. Un ejemplo de contaminación de aguas superficiales: el curso alto del río Lerma, México. In: Antón, D. & C. Díaz-Delgado (Eds.). *Sequía en un mundo de agua* / En línea. Piriguazú ediciones y CIRA-UAEM, México, pp. 185-226.
- IMTA (INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA), 2003. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Hidrometría y sedimentos hasta 2002. CNA-SEMARNAT. Jiutepec, Morelos, México. 8 CD's.
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA), 1970. *Cartas temáticas INEGI*, escala 1:50000 (E14A27, E14A37, E14A28 y E14A48), México.
- LAWSON, D. R. & J.W. WINCHESTER. 1979. A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment* 13: 925-930.
- MASON, B. & C. B. MOORE. 1982. *Principles of Geochemistry*. John Wiley & Sons Inc, United States of America, 344 p.
- POISSANT, L., J. P. SCHMIT & P. BERON. 1994. Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmospheric Environment* 24: 339-345.
- RODRÍGUEZ, A. S. & P. ÁVILA -PÉREZ. 1997. Stock of immobilized metals in "Jose Antonio Alzate dam mud sediment samples in the State of México, México. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 221 (1): 231-234.
- TEJEDA, S., P. ÁVILA -PÉREZ, G. ZARAZÚA, L. CARAPIA-MORALES, C. DÍAZ-DELGADO & J. LUGO. 2006. "Distribución de metales pesados en sedimentos: estudio del Curso Alto del Río Lerma". In: Rivera-Trejo, F., Gutiérrez-López, A., Val-Segura, R., Mejía-Zermeño, R., Sánchez Ruíz, P., Aparicio-Mijarez, J. & Díaz-Flores, L. (Eds.). "La medición de sedimentos en México". Ediciones IMTA-UJAT, Jiutepec, Morelos/ Villahermosa Tabasco, México. 216 p.
- VACA, P. R. 1996. Determinación de metales pesados en dos tipos de suelo bajo bosque y cultivo en el Alto Lerma, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México. 69 p.
- VALDÉS, F.M. & A. M. JARAMILLO. 1994. *Sistema para el Análisis por Fluorescencia de Rayos X*, Manual del Usuario, Centro de Estudios Aplicados al Desarrollo Nuclear, La Habana, Cuba, 76 p.
- VAN ESPEN, P., K. JANSSENS & I. SWENTERS. 1993. *Axil X-Ray Analysis Software*, User Manual, Canberra Packard, Benelux, IAEA, Seiberdoff, Austria, 81 p.
- WEBBER, M.D.1988. Controle de la concentration de métaux lourds dans les sols apres epandage de bouts d'égout municipales : l'approche canadienne. *Sciences et Techniques de L'eau* 21: 45-51.

Recibido: 8 de septiembre de 2005.

Aceptado: 15 de mayo de 2007.