Capítulo 9

Un ejemplo de contaminación de aguas superficiales: el curso alto del río Lerma, México

El sistema hidrológico Lerma-Chapala-Santiago es uno de los más importantes de México, con una superficie estimada de 130, 000 km^2. Se trata de una cuenca compleja que ocupa gran parte del Estado de México, norte de Michoacán, sureste de Querétaro, sur de Guanajuato, este, centro y norte de Jalisco, todo Aguascalientes, el sur de Zacatecas, sureste de Durango y noroeste y centro de Nayarit. Por su gran extensión y orografía diversa la cuenca posee diferentes climas, desde los templados de altura hasta los tropicales lluviosos y es en ella donde se encuentra varios de los centros de población más importantes del Altiplano Central Mexicano.

La porción superior de la cuenca es drenada por el río Lerma[1], mientras que la porción inferior desagua a través del Río Grande Santiago. Ambos ríos sumados tienen una longitud de 1180 km. A ello hay que agregar los 76 km de extensión del Lago de Chapala que funciona dentro del sistema como un embalse natural e intermedio. Del desfogue del lago nace el Río Grande Santiago con una longitud de 475 km hasta su desembocadura en el Río Asadero en San Blas, Nayarit. Por su parte el Río Lerma vierte su caudal en el Lago de Chapala después de un recorrido de 705 km desde su nacimiento en el Altiplano del Valle de Toluca, Estado de México.

Fue en el sector superior de esta cuenca que el Centro Interamericano de Recursos del Agua, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y la

Universidad de California en Berkeley decidieron llevar a cabo un estudio detallado de la dinámica de los contaminantes en el agua. La investigación se concentró en el embalse José Antonio Alzate, que represa el caudal del río Lerma a un centenar de quilómetros de sus nacientes.

La cuenca del Río Lerma en el contexto nacional

Hasta antes de 1951, las zonas deprimidas de la Cuenca Alta del Río Lerma contaban con un sistema lagunar integrado que sobre todo se alimentaba de manantiales, como los de Almoloya, Texcaltengo, Alta Empresa y otros. Estas lagunas tenían una longitud total de 30 km y se conectaban entre sí por canales cortos que unían la Laguna de Almoloya con la Laguna de Chimaliapan en Lerma y San Bartolomé Otzolotepec. En estos cuerpos de agua se ubicaba el nacimiento del Río Lerma.

Sin embargo, a partir de 1970, se concluyeron las obras de 230 pozos y de 170 km de acueductos para suministrar un poco más de 14 m^3/s al Distrito Federal[2], modificándose de manera importante los ecosistemas lacustres del área.

El perfil longitudinal del colector principal de la Cuenca Alta del Río Lerma y un criterio hidrológico-tectónico permiten la división de su curso en tres porciones: Alto, Medio y Bajo. Ello permite un ordenamiento espacial jerárquico por regiones hidrográficas y por subcuencas.

El Curso Alto comprende la vertiente norte de la sierra Nahautlaca-Matlazinca, así como la vertiente nororiental del Nevado de Toluca. En esta área queda contemplado el altiplano más meridional de la cuenca con 2,580 m.s.n.m. Aproximadamente 9 km aguas abajo de la presa J. Antonio Álzate y a una altitud de 2,570 m.s.n.m. termina el curso alto en el escalonamiento tectónico del Valle de Ixtlahuaca. A partir de éste, se inicia el Curso Medio que termina con el descenso del río hasta la fosa tectónica Solis-Acambay a una altitud de 2,500 m.s.n.m., donde se inicia el Curso Bajo hasta que el río abandona el territorio estatal (Gobierno del Estado de México, *Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del Río Lerma,* 1993).

Aspectos de la evolución ambiental

La cercanía de la cuenca con la Ciudad de México, una de las concentraciones humanas más grandes del mundo, se ha convertido en un factor crítico de presión social y política que repercute principalmente en el recurso agua. La presión ejercida por la Ciudad de México es tan fuerte que por tratar de resolver parcialmente el problema de abastecimiento de agua potable se

han sobreexplotado los recursos disponibles de agua de la Cuenca Alta del Río Lerma. Sin embargo, no existe una cuantificación precisa del grado de sobreexplotación.

A pesar de los problemas ambientales comprobados, la mortalidad por enfermedades infecciosas intestinales de origen hídrico ha disminuido en forma sostenida durante los últimos 60 años. En 1990, se observaban tasas promedio nacionales del 32 por cien mil habitantes, decreciendo éstas hasta un 11.8 por cien mil habitantes en 1994. Para el Estado de México, donde nace el río Lerma, la tasa de mortalidad infantil por enfermedades infecciosas intestinales fue de 576.6 por cien mil habitantes en 1990, disminuyendo en los siguientes años hasta registrarse una tasa del 224.7 por cien mil habitantes en 1994 (Pavón *et al.*, 1997).

La Cuenca Alta

Esta cuenca considerada como una de las más importantes de México, es representativa de la problemática existente en la mayor parte de las cuencas mexicanas, por su intensivo desarrollo industrial y ocupación urbana. El desarrollo industrial ha acarreado un explosivo crecimiento de la población y consecuentemente de la demanda de servicios, entre los que destaca por su importancia vital, el de agua potable. Asimismo, paralelamente a la industrial, se produjo una importante expansión agrícola. Aún cuando tiene un valor económico menor, su demanda hídrica supera, con mucho, la suma de demandas de la industria y de la población.

El crecimiento en la industrialización en el valle de Toluca después de 1960 provocó el aumento en la generación de desechos y las descargas de aguas residuales que en conjunto con las descargas de aguas de origen doméstico y la disminución del caudal convirtieron al río Lerma en uno de los más contaminados de México (Barcelo-Quintal *et al.* 1998).

Características fisiográficas de la subcuenca

Las características físicas de la cuenca fueron cartografiadas a través del procesamiento de un MEDT con resolución de 90 metros. La resolución es la apropiada para un estudio a escala 1:250,000, y los resultados obtenidos están en función de la misma[3].

La ilustración de la figura 9.1 muestra una perspectiva sombreada de la orografía del área de estudio. Es de resaltar la energía de relieve que sobresale en la porción sur (Nevado de Toluca) y en la porción oriental (la Sierra de las Cruces). En la figura 9.2 se presenta un mapa hipsométrico sintético.

En el cuadro 9.1 se resumen los resultados obtenidos en la estimación de

Figura 9.1

Perspectiva sombreada del relieve en el área

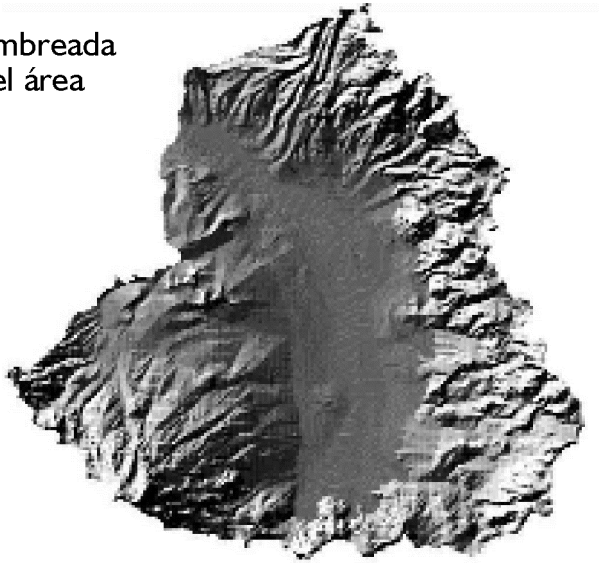
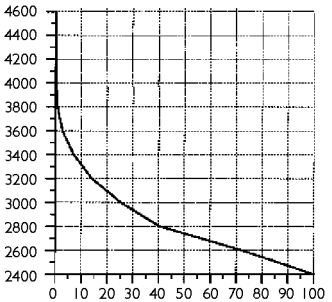


Figura 9.2

Curva y mapa hipsométricos de la cuenca derivados del MEDT

Curso alto del río Lerma, Estado de México, México (valores cuantitativos derivados del MEDT)



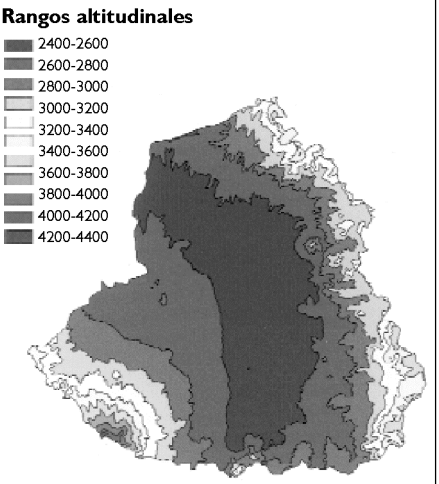


Figura 9.3

Orden de las corrientes del CARL

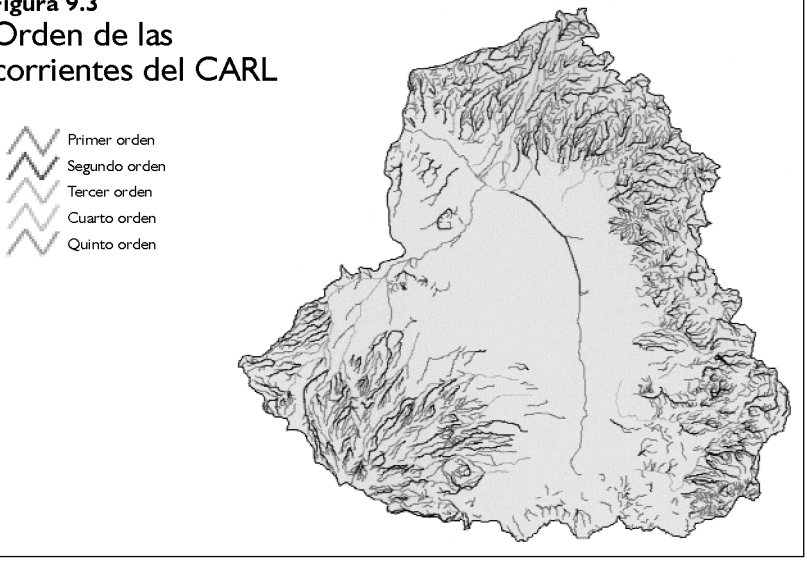
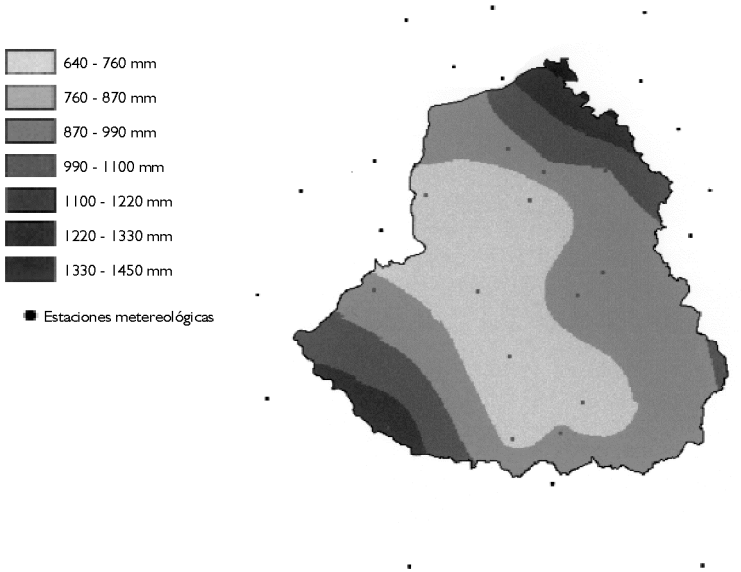


Figura 9.4

Precipitación media anual en la subcuenca.



las características fisiográficas del Curso Alto del Río Lerma y donde para cada uno de los análisis efectuados se incluyen los comentarios pertinentes.

Análisis pluviométrico de la subcuenca

Durante el estudio se encontraron serias deficiencias en la calidad y cantidad de los datos básicos para llevar a cabo un estudio hidrológico de la cuenca. A pesar de existir un buen número de estaciones pluviométricas, muchas no tienen todos sus registros, algunas han desaparecido y otras operan bajo condiciones inadecuadas. Sin embargo, con el fin de obtener una evaluación de la precipitación, se han considerado aquellas estaciones que coinciden en su período de registro, lo cual ocurre en el período de 1963-1983.[4] Los datos obtenidos incluyen:

- Las precipitaciones totales para cada uno de los quince años de observación considerados y
- Las precipitaciones promediales mensuales.

El método de interpolación utilizado para este proceso fue el de Kriging Universal, que corresponde a un modelo lineal (ver mapas en anexo)[5].

Análisis de caudales medios del curso alto del río Lerma[6]

El curso del río Lerma nace en la práctica en las Lagunas de Lerma (Lagunas Chiconahuapan, Chimaliapan y Chignahuapan), las cuales estaban alimentadas, principalmente, por un conjunto de manantiales habiendo sido los más importantes los de Almoloya, Texcaltenga y Alta Empresa.

En la actualidad estos manantiales se han secado debido a los aprovechamientos que se señalan al final y las únicas aguas que alimentan las mencionadas lagunas provienen de los escasos escurrimientos superficiales de la cuenca natural de las mismas.

El río Lerma recibe en su primer tramo algunos afluentes importantes como son: por su margen derecha, las ríos Calpulhuac, San Luis, Ameyalco, Otzolotepec y Santo Domingo y por su margen izquierda El Ocotillo, Tejalpa, La Gavia y Jaltepec. En el río Jaltepec existe, desde hace mucho tiempo, la pequeña presa Tepetitlán que recientemente quedó inundada dentro del embalse del nuevo vaso Tepetitlán. También han sido construidas en los últimos años las presas Ignacio Ramírez sobre el río de La Gavia y la José Antonio Alzate sobre el propio río Lerma, estructuras que modifican apreciablemente el escurrimiento natural de la corriente principal. Sin embargo, el motivo más importante de la alteración del régimen del río Lerma en este tramo ha sido la extracción de aguas del subsuelo para abastecer a la ciudad de México y, particularmente, con la nueva serie de pozos

Cuadro 9.1

Características fisiográficas de la subcuenca

Cuenca del Curso Alto del Río Lerma		Comentarios
Superficie y Perímetro	A = 2117.88 km^2 P = 241.79 km.	La superficie y perímetro utilizados fueron aquellos obtenidos con el uso del SIG y MEDT.
Coeficiente de compacidad	K_c=1.481	El valor obtenido indica que la cuenca del CARL tiende a un cuadrado, es decir que su largo y ancho son valores cercanos.
Relación de circularidad	R_{ci}= 0.455	Este coeficiente corrobora la cercanía de la forma de la cuenca del CARL con un cuadrado.
Radio de elongación	Re= 1.07	De acuerdo con el valor obtenido se infiere que la cuenca es predominantemente plana pero con porciones accidentadas.
Curva hipsométrica y elevaciones características	H_{max}=4549 m.s.n.m. H =2848 msnm H_{min}=2556 m.s.n.m.	De este análisis se obtiene la altitud máxima, media y mínima de la cuenca. Por otro lado, por la forma de la curva hipsométrica se infiere que se trata de una cuenca erosionada y clasificada como de valle.
Pendiente de la cuenca	$\bar{\alpha}$ = 4.88° m = 8.54% m_{min}=0.00% m_{max}=50.00%	El ángulo medio de inclinación de la cuenca es de 4.88° correspondiente a una pendiente media de la cuenca de 8.54%. La pendiente mínima y máxima son 0.00% y 50.00% respectivamente. Con base en el análisis por rangos de pendiente se tiene que el 52.52% de superficie se clasifica como suave a llano, el 30.15% como accidentado a accidentado medio, 11.33% como fuertemente accidentado y el 8% como terreno escarpado.
Orientación de la cuenca	Plano :23.17% N:21.38%, E:19.22% W:20.44%,S:15.79%	Este análisis ha permitido identificar una distribución casi equilibrada de orientación de pendientes, factor que influye en el análisis de evapotranspiración y donde las horas de insolación son consideradas.
Características del drenaje de la cuenca	$\overline{Rb}$ = 4.36 Orden del río Lerma es: 5 (Horton-Strahler)	La generación de datos relativa al drenaje de la cuenca ha requerido el uso de información a escala 1:50 000. El valor de la relación media de bifurcación de los cauces es de. Con el valor obtenido de bifurcación, se dice que la estructura geológica de la cuenca no distorsiona el modelo de drenaje. Con la ayuda de las herramientas aquí utilizadas es posible obtener con mayor detalle la distribución de la densidad de drenaje, detalle que difícilmente puede ser logrado manualmente. Como es de esperar las áreas con mayor densidad de drenaje se ubican en las vertientes del Nevado de Toluca y en la parte occidental de la Sierra de las Cruces.
Características del río principal	L=50.2 km. $S_{río}$ = 0.11% S_h = 1.16	En el caso del Curso Alto del Río Lerma, considerado desde su nacimiento hasta la cortina de la presa J. A. Alzate, el cauce tiene una longitud de 50.2 kms y una pendiente promedio de 0.11%. El cauce presenta una sinuosidad hidráulica de 1.16. Puesto que el valor de la sinuosidad hidráulica es menor que 1.25 y que la longitud del tramo es mayor de diez veces la sección transversal del cauce, se dice estar en presencia de un río recto.

perforados a lo largo del Valle hasta Atlacomulco, con una explotación del orden de $5m^3/s$ en total.

Los principales afluentes

El río Tejalpa, con una cuenca de 225 Km^2, es afluente por la margen izquierda del río Lerma uniéndose a éste un poco abajo de la hacienda "La Y". Nace en el cerro La Calera a elevaciones del orden de 3500 m.s.n.m. y corre con rumbo al Noreste pasando por San Francisco Tlalcilalcalpan, Calixtlahuaca, San Pablo Autópan y otras poblaciones menores, antes de concluir al río Lerma fluyendo muy cerca de la ciudad de Toluca.

El río Temoaya (cuenca de 74.0 Km^2) es un pequeño aportador del río Lerma, con origen en el cerro de Las Palomas, a unos 9 km al Oeste de Santiago Tlazala. El colector desciende desde una altitud del orden de 3500 m.s.n.m. con dirección Noroeste, la cual cambia gradualmente mediante una curva, al Suroeste. En esta trayectoria incrementa su caudal al recibir las aportaciones del manantial Los Ojuelos y 6 km aguas abajo recibe, por la margen izquierda, un afluente denominado arroyo El Rincón, 2.9 km aguas abajo confluye por la margen derecha al río Agua Blanca y a partir de esta confluencia se le conoce como río Miranda y adelante como río Caballero. Esta parte de su cuenca se caracteriza por lo accidentado del terreno y por lo pronunciado de la pendiente de su cauce. Aguas abajo (3.2 km) de la última confluencia citada, recibe por la margen derecha el arroyo Guampa, a cuya altura se encuentra la población de Temoaya, Méx.; adelante corre por una zona plana, donde se le aprovecha para riego mediante un pequeño canal que se deriva por su margen izquierda y aguas abajo cruza, mediante un sifón, la carretera del D.F. que corre paralela al acueducto del Alto Lerma. Más abajo (1.2 km) se encuentra el sitio de la estación hidrométrica Las Trojes operada por la S.A.R.H. y finalmente descarga sus aguas al río Lerma, en un punto que se halla unos 400 m aguas arriba del embalse de la presa Antonio Alzate.

Caudales no aforados

La información de las estaciones hidrométricas que se utilizaron en el presente estudio (la Y, Las Trojes y Calixtlahuaca) miden 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 ninguna estación de aforo. Por tal razón, y teniendo en consideración las características fisiográficas y régimen pluviométrico de las zonas no aforadas, se procedió a la cuantificación de los caudales no aforados por ponderación de superficies homogéneas.

La figura 9.6 muestra la distribución de área tributaria para cada una de las estaciones hidrométricas seleccionadas y las áreas de las zonas no aforadas. El caudal procedente de la zona no aforada de la margen derecha fue estimado por ponderación de caudales medios diarios de la estación las Trojes y el caudal generado por la zona no aforada de la margen izquierda del embalse fue estimado por la ponderación de la suma de caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas la Y y Calixtlahuaca. El coeficiente de ponderación para los caudales de la estación las Trojes es de 2.19 y para la suma de caudales de las estaciones la Y y Calixtlahuaca fue de 1.082.

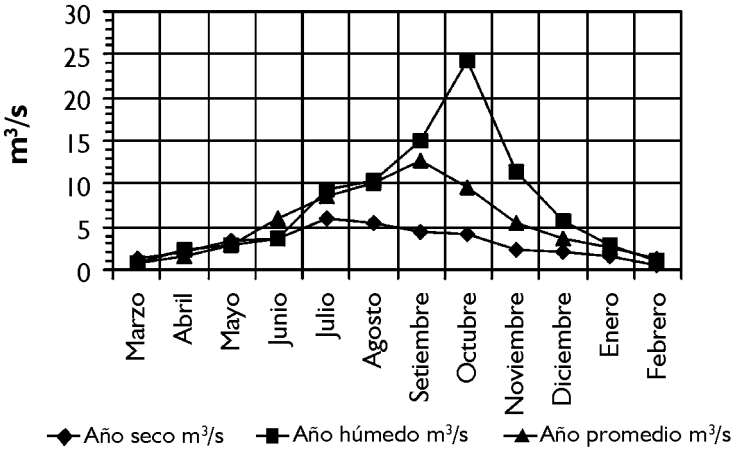
$$Q_{\text{diario CARL}} = 2.19\ (Q_{\text{diario Trojes}}) + 1.082\ (Q_{\text{diario y}} + Q_{\text{diario Calixtlahuaca}}) \quad (1)$$

Análisis de caudales medios mínimos del curso alto del río Lerma

El presente análisis de caudales medios mínimos representa las entradas mínimas de agua al embalse. El mismo se realizó usando como base las técni-

Figura 9.5

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



Cuadro 9.3

Producción de agua por cuenca y su distribución temporal para el año más seco, más húmedo y promedio de valores medios.

Río: Lerma **período de registros: 1943-1990**
Estación: La Y
Fecha: 20 de octubre de 1999

mes	Año seco 1957-58		Año húmedo 1958-59		Año promedio		
	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	% contrib.
Marzo	0.116	0.3107	0.480	1.2856	0.732	1.9598	2
Abril	0.333	0.8631	0.313	0.8113	0.850	2.2023	2
Mayo	0.579	1.5508	1.240	3.3212	1.306	3.4991	3
Junio	1.493	3.8699	2.581	6.6899	3.010	7.8014	6
Julio	2.438	6.5299	10.627	28.4633	5.709	15.2900	12
Agosto	3.063	8.2039	12.757	34.1683	7.937	21.2574	17
Septiembre	3.389	8.7843	20.432	52.9597	10.269	26.6183	21
Octubre	2.162	5.7907	18.197	48.7388	8.356	22.3812	18
Noviembre	1.149	2.9782	14.141	36.6534	4.550	11.7942	9
Diciembre	0.765	2.0490	8.050	21.5611	2.614	7.0026	6
Enero	2.039	5.4612	4.131	11.0644	1.776	4.7582	4
Febrero	1.500	3.6288	1.450	3.5078	1.083	2.6195	2
Media anual	1.586	50.0206	7.867	249.2252	4.016	127.1843	100.00

Río: Tejalpa **período de registros: 1963-1992**
Estación: Calixtlahuaca
Fecha: 20 de octubre de 1999

mes	Año seco 1982-83		Año húmedo 1990-91		Año promedio		
	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	% contrib.
Marzo	0.033	0.0874	0.047	0.1263	0.035	0.0926	0.5
Abril	0.082	0.2121	2.576	6.6769	0.173	0.4497	2.2
Mayo	0.491	1.3164	4.338	11.6202	0.491	1.3150	6.4
Junio	0.278	0.7213	1.737	4.5026	0.943	2.4447	12.0
Julio	0.632	1.6924	3.045	8.1558	1.335	3.5758	17.5
Agosto	0.302	0.8091	1.573	4.2121	1.482	3.9699	19.5
Septiembre	0.432	1.1191	1.786	4.6286	1.680	4.3550	21.3
Octubre	0.141	0.3764	0.932	2.4970	0.994	2.6634	13.1
Noviembre	0.017	0.0444	0.399	1.0354	0.334	0.8663	4.2
Diciembre	0.011	0.0291	0.137	0.3679	0.103	0.2751	1.3
Enero	0.020	0.0537	0.045	0.1204	0.082	0.2192	1.1
Febrero	0.023	0.0545	0.026	0.0628	0.072	0.1735	0.9
Media anual	0.205	6.5159	1.387	44.0060	0.644	20.4001	100.00

Río: Temoaya **período de registros: 1975-1992**
Estación: Las Trojes
Fecha: 20 de octubre de 1999

mes	Año seco 1988-89		Año húmedo 1976-77		Año promedio		
	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	% contrib.
Marzo	0.030	0.0798	0.054	0.1459	0.022	0.0592	0.5
Abril	0.043	0.1108	0.272	0.7039	0.063	0.1637	1.3
Mayo	0.041	0.1095	0.378	1.0125	0.208	0.5572	4.3
Junio	0.219	0.5674	0.527	1.3653	0.475	1.2302	9.6
Julio	0.735	1.9685	0.793	2.1248	0.728	1.9497	15.2
Agosto	0.414	1.1083	0.760	2.0366	0.748	2.0041	15.6
Septiembre	0.446	1.1572	1.342	3.4785	0.905	2.3465	18.3
Octubre	0.233	0.6236	1.487	3.9817	0.649	1.7377	13.6
Noviembre	0.120	0.3109	0.994	2.5763	0.461	1.1954	9.3
Diciembre	0.134	0.3598	0.732	1.9617	0.339	0.9071	7.1
Enero	0.081	0.2165	0.412	1.1034	0.208	0.5579	4.4
Febrero	0.009	0.0226	0.086	0.2072	0.047	0.1146	0.9
Media anual	0.209	6.6347	0.653	20.6979	0.404	12.8233	100.00

Río: Lerma **período de registros: 1975-1990**
Estación: Cortina presa José Antonio Álzate **(obtenida por ponderación hidrológica)**
Fecha: 20 de octubre de 1999

mes	Año seco 1982-83		Año húmedo 1976-77		Año promedio		
	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	m^3/s	millones m^3	% contrib.
Marzo	1.334	3.5740	0.665	1.7816	0.843	2.2581	1
Abril	1.960	5.0807	2.382	6.1761	1.589	4.1196	2
Mayo	3.473	9.3024	2.798	7.4964	2.943	7.8844	5
Junio	3.628	9.4060	3.593	9.3147	5.946	15.4128	9
Julio	6.047	16.1967	9.268	24.8251	8.521	22.8242	13
Agosto	5.411	14.4951	10.361	27.7509	10.211	27.3501	16
Septiembre	4.489	11.6356	15.106	39.1550	12.774	33.1113	19
Octubre	4.081	10.9321	24.353	65.2293	9.463	25.3471	15
Noviembre	2.413	6.2546	11.377	29.4902	5.322	13.7958	8
Diciembre	2.009	5.3809	5.759	15.4261	3.586	9.6063	6
Enero	1.551	4.1545	2.946	7.8921	2.461	6.5934	4
Febrero	0.643	1.5577	0.982	2.3762	1.363	3.2994	2
Media anual	3.086	97.9711	7.466	236.9142	5.419	171.6030	100.00

cas de evaluación de sequías hidrológicas. De acuerdo a esta técnica, la sequía se presenta cuando la disponibilidad de agua no alcanza a proporcionar una demanda mínima requerida para satisfacer el sistema (Dracup *et al.*, 1980).

Aplicando la definición antes expresada (en términos de satisfacción ecológica mínima requerida para que la cuenca y su sistema hídrico fuesen capaces de soportar la carga de contaminación vertida), el umbral ecológico de entradas de agua al embalse correspondería a un valor que permitiera condiciones aceptables en la calidad del agua almacenada.

Las condiciones actuales de la cuenca son demasiado complejas para determinar apropiadamente el caudal ecológico mínimo requerido para definir el umbral de los caudales mínimos aceptables. Por tal razón, se procedió a la evaluación de las características de caudales mínimos y de la posible recuperación del sistema ante tales valores. En fase posterior se efectuó la comparación entre la recuperación de la calidad del agua en el tramo de río sin embalse y los valores reales de calidad del agua con embalse.

Por otro lado, cualquier valor de caudal, en especial los caudales míni-

Figura 9.6

Hidrograma promedio interanual, año seco y año húmedo de la estación: La Y.

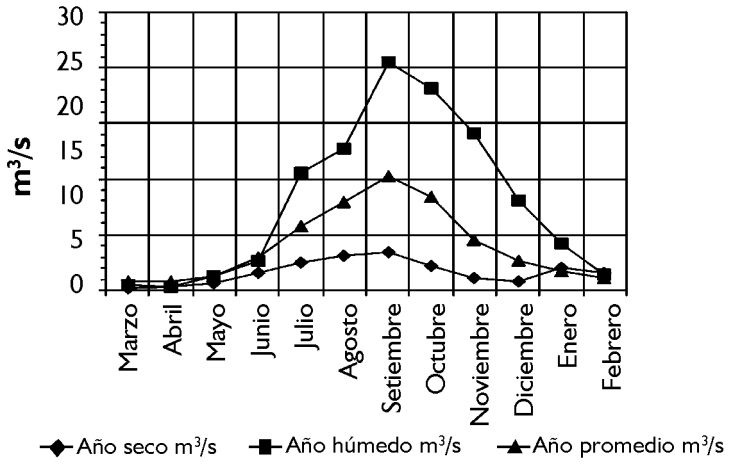


Figura 9.7

Hidrograma promedio interanual,
año seco y año húmedo de la estación: Calixtlahuaca.

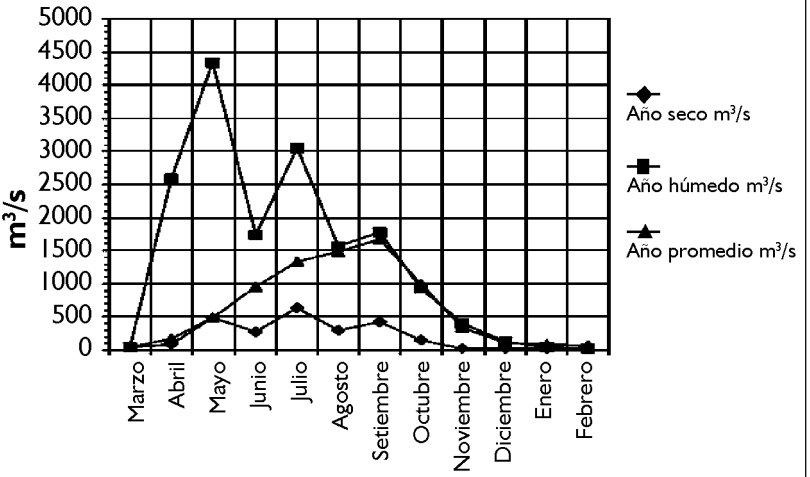
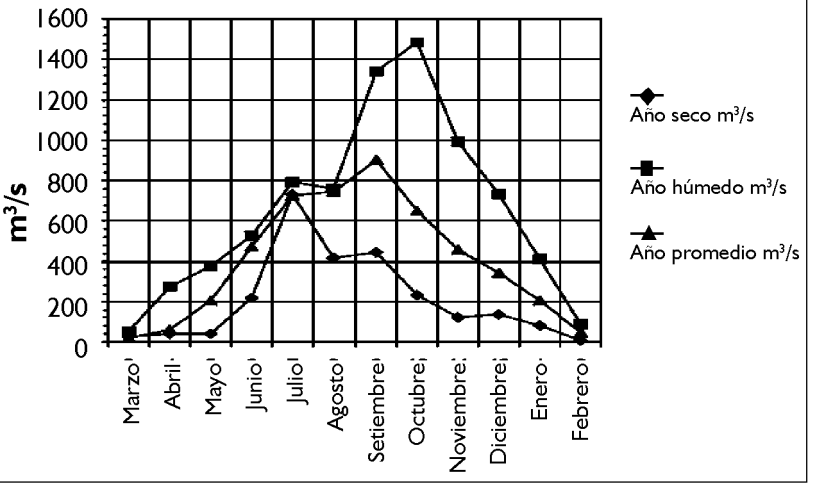


Figura 9.8

Hidrograma promedio interanual,
año seco y año húmedo de la estación: Las Trojes



mos, puede presentar variaciones artificiales, e incluso una carencia extrema de agua, sin relación con un período prolongado de sequía.

Para definir las características de los caudales mínimos se requieren tres principales parámetros:

1. El valor mínimo promedio de caudal presentado en n días consecutivos, es decir la media móvil de orden n.
2. Las fechas o el período de su ocurrencia y
3. La frecuencia atribuible al fenómeno.

Así pues, los caudales mínimos de sequía están asociados con valores de caudal que no exceden un cierto umbral durante cortos periodos de tiempo. En hidrología, el análisis de caudales mínimos es necesario antes de utilizar el curso de agua como una fuente de abastecimiento. En este caso, el análisis de caudales mínimos tendría la finalidad de evaluar la capacidad de autodepuración del río. El análisis de frecuencia sobre los caudales mínimos, es el método más utilizado en este tipo de fenómenos.

Período de duración de caudales mínimos

La información sobre la frecuencia de los caudales mínimos es obtenida a partir de un análisis de la distribución anual de caudales mínimos observados. Para ello, es necesario ordenar la información existente por años hidrológicos, y no necesariamente años naturales, considerando un año hidrológico el contenido entre dos picos máximos separados por doce meses. El estudio de caudales mínimos se lleva a cabo bajo la selección de caudales mínimos promedio de diferentes tamaños; es decir, la media móvil de orden 1, 3, 7, 15 y 30 días.

Función de distribución de probabilidad de ajuste

El ajuste de una distribución de probabilidad a una muestra hidrológica, es un proceso que consiste en encontrar una función cuya similitud con la información disponible sea la más apropiada. En estas condiciones se utiliza la muestra de observaciones de la variable hidrológica para orientar la elección del modelo matemático que, teniendo las propiedades estadísticas de la muestra, permita por extrapolación evaluar valores no observados y asignarles un determinado período de retorno (Llamas, 1993). Una de las funciones de distribución comúnmente utilizadas para el análisis de frecuencias de variables hidrológicas de valores mínimos es la función Log-Normal 3, LN3, (Llamas, 1993; Rassam, 1988).

Cabe la pena mencionar que el análisis de frecuencias fue realizado con ayuda un software desarrollado recientemente en el Centro Interamerica-

no de Recursos del Agua denominado ANFREHID 1.0 (Trujillo, 1999).

Obtención de las series de medias móviles de caudales medios mínimos del Curso Alto del Río Lerma.

Lao cuadros 9.4 y 9.5 muestran los datos de las series de medias móviles de orden 1,3,7,15 y 30 días para el período de registros de caudal de 1974 –1990, así como los valores obtenidos del análisis de frecuencia para diferente período de retorno.

Evaluación de autodepuración del río Lerma

En el tramo del río Lerma entre la carretera Toluca-México y la presa Alzate, de aproximadamente 25 km, se encuentran condiciones de oxígeno disuelto de 0 mg/l en los meses de noviembre a mayo. Las cargas orgánicas que generan valores de DBO del orden de 200 mg/l (ver figura 9.9) son tan altas que en época de estiaje con caudales del río tan bajos (menos de 2 m^3/s en promedio) no existe posibilidad de reoxigenación en el tramo.

Durante los meses de lluvias junio-octubre los valores de DBO disminuyen por el efecto de dilución. Los valores de oxígeno disuelto no parecen superar niveles de 4 mg/l, los cuales aún son deficitarios al estar por debajo de

Cuadro 9.4

Medias móviles de caudales medios mínimos del Curso Alto del Río Lerma.

año	Media móvil de orden 1 m^3/s	Media móvil de orden 3 m^3/s	Media móvil de orden 7 m^3/s	Media móvil de orden 15 m^3/s	Media móvil de orden 30m^3/s
1974	0.33	0.33	0.43	0.50	0.58
1975	0.34	0.35	0.37	0.44	0.53
1976	0.34	0.37	0.42	0.47	0.51
1979	1.00	1.03	1.06	1.11	1.26
1980	0.87	0.91	0.92	0.94	0.98
1981	0.93	0.97	1.02	1.04	1.26
1982	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
1983	0.43	0.44	0.46	0.49	0.50
1984	0.73	0.75	0.78	0.84	0.87
1985	0.03	0.03	0.04	0.07	0.41
1986	0.65	0.72	0.80	0.84	0.91
1989	1.06	1.11	1.14	1.22	1.37
1990	1.37	1.45	1.53	1.61	1.74

Cuadro 9.5

Análisis de frecuencias de medias móviles de caudales medios mínimos del Curso Alto del Río Lerma (Ajustes realizados con la función LN3).

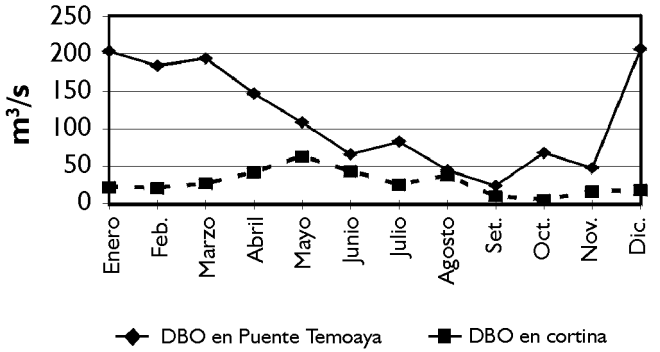
Media móvil de orden (días)	$\overline{Q_{min}}$ m^3/s T= 2 años	$\overline{Q_{min}}$ m^3/s T= 5 años	$\overline{Q_{min}}$ m^3/s T= 10 años	Coeficiente de correlación gráfica en el ajuste (r)
01	0.62	0.97	1.16	0.9859
03	0.64	1.02	1.22	0.9856
07	0.68	1.07	1.27	0.9841
15	0.73	1.12	1.33	0.9842
30	0.82	1.23	1.46	0.9832

la mitad del valor de saturación.

Un análisis de las condiciones mínimas para saneamiento del tramo requiere de un conocimiento profundo, que no se tiene de las descargas de aguas residuales. Por esa razón sólo se puede concluir que las acciones de tratamiento de aguas residuales son aún insuficientes y que el caudal de autodepuración del río es mucho mayor que los valores promedios que se presentan actualmente aún en época de lluvias. Es especialmente crítica la situación en la época enero-marzo donde se encuentran valores promedios en

Figura 9.9

Balance de DBO en la presa Alzate



7 días de 0.68 m^3/s.

Lo que sí se puede analizar a partir del gráfico 9.11 es el efecto que la presa Alzate tiene en la mejoría de la calidad del agua del río Lerma. En efecto se aprecia una eficiencia de remoción de DBO en la presa del orden del 80% en los meses de niveles altos del embalse: noviembre-marzo. En los meses de niveles bajos esta eficiencia disminuye pero estos meses coinciden con el período de lluvias en el cual la dilución del río es mayor.

Análisis de procesos sedimentarios en la Presa Alzate

Con el objetivo de tener un estimativo del volumen de acumulación de sedimentos en la presa, de su posible distribución en el embalse y de la influencia que el proceso de deposición de los sedimentos tiene con las concentraciones de los metales pesados medidos en este estudio, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Medición de la concentración de sedimentos en suspensión a la entrada de la presa Alzate en el río Lerma
- Análisis granulométrico de sedimentos superficiales a todo lo largo de la presa.
- Determinación espacial del contenido de materia orgánica en sedimentos superficiales.

Cuantificación del aporte de sedimentos al Embalse Alzate

Las mediciones de sedimentos en suspensión en el río Lerma se efectuaron en el sitio del puente de la carretera Toluca-Temoaya. Este lugar se encuentra 2 km aguas arriba del poblado San José Pathé donde se puede decir que comienza el embalse Alzate, por lo tanto es una medida de la entrada de sedimentos a la presa Alzate por el río principal. Se efectuaron mediciones de perfiles de concentración en la vertical con periodicidad semanal. Las profundidades de muestreo variaron de acuerdo al tirante del río. Para tirantes bajos, menores de 2 metros, se efectuaron cada 20 cm, para tirantes medios, de hasta 3 m, cada 30 cm[7] y para tirantes altos, mayores de 3m, cada 40 cm. Los resultados que se presentan en las figuras 10 a 12 muestran una gran variación estacional. Durante los meses secos abril- mayo las concentraciones raramente superan los 150 mg/l, en tanto que para los meses de lluvia los valores son usualmente mayores de 300 mg/l con valores hasta de 1200 mg/l.

Los anteriores gráficos demuestran que durante los meses de junio a agosto se lleva a cabo el mayor transporte de sedimentos al embalse Alzate. Estos meses corresponden al comienzo de las mayores precipitaciones.

Figura 9.10

Medición de sedimentos en suspensión, río Lerma (junio-julio 1999)

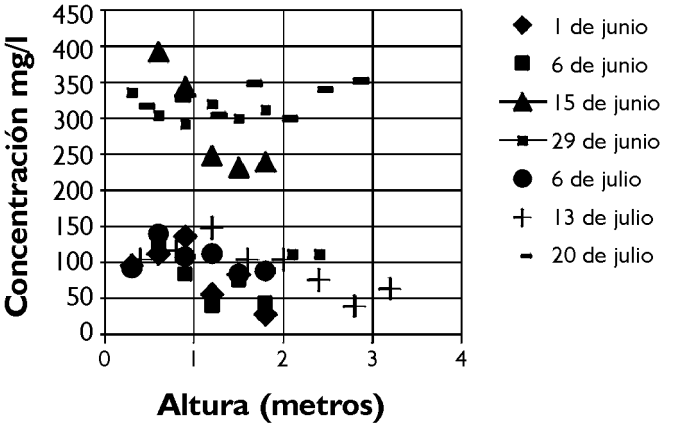


Figura 9.11

Medición de sedimentos en suspensión, río Lerma (agosto-setiembre. 1999)

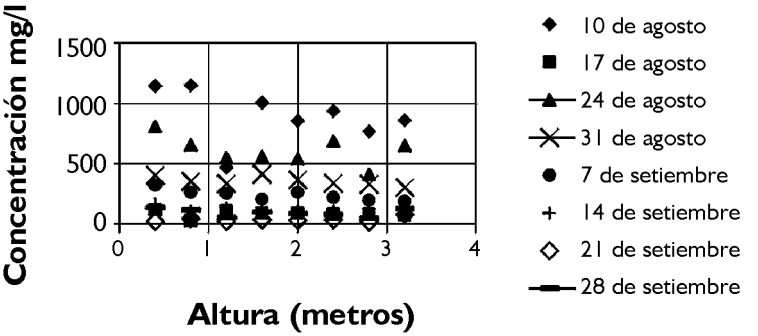
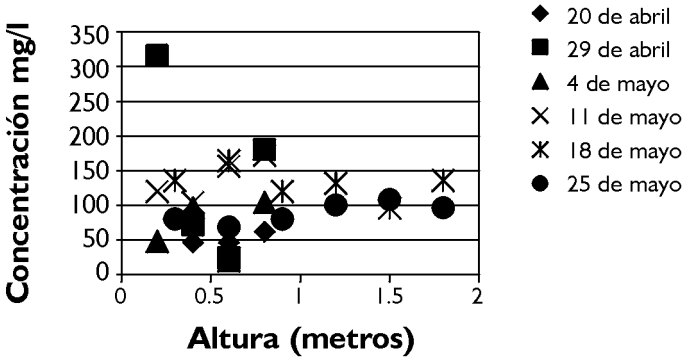


Figura 9.12
Medición de sedimentos en suspensión, río Lerma (abril-mayo 1999).



Sin embargo no son necesariamente los meses de mayor caudal líquido. El fenómeno puede estar asociado a la mayor disponibilidad de sedimentos en la cuenca los cuales son arrastrados por las primeras lluvias fuertes. Los caudales de los meses subsiguientes, aunque grandes por el efecto del flujo base, no encuentran sedimentos en tal cantidad y por lo tanto las concentraciones decrecen para caudales similares a los de agosto.

Determinación de la relación caudal líquido- caudal sólido

Para determinar el volumen influente de sedimentos se calculó una concentración media en mg/l para cada perfil. Con esa y el caudal estimado sobre la base del tirante medido, se calculó la carga sólida correspondiente en toneladas por día. Posteriormente se efectuó una correlación caudal sólido (Qs)- caudal líquido(Ql) a fin de poder inferir los caudales sólidos para los valores promedios multianuales de caudales líquidos. Esto se realizó en vista del corto período de muestreo de sedimentos en suspensión y de la valiosa disponibilidad de datos de caudal líquido de más de 40 años.

Las correlaciones caudal líquido-caudal sólido se intentaron utilizando la totalidad de los datos medidos de caudal sólido. Sin embargo el ajuste estadístico logrado utilizando regresiones de tipo linear, potencial, logarítmico

y polinomial no fue bueno con coeficientes de determinación r^2 menores de 0.5. En vista de la relación ya explicada de los perfiles de concentración con las condiciones hidrológicas se procedió a un análisis estacional de esos perfiles, el cual presentó parámetros estadísticos mucho más aceptables para el caso de los meses de lluvias. Las correlaciones encontradas se presentan a continuación.

En las anteriores correlaciones se detecta claramente el efecto de disponibilidad de sedimentos. Para los primeros meses de lluvia se encuentra una correlación (figura 9.13) con buen coeficiente de determinación (r^2=0.74) la cual predice caudales sólidos altos para un determinado caudal líquido (por ejemplo para Ql=8 m3/s el correspondiente Qs=400 ton/día). Para los meses que siguen (figura 9.14) la correlación es igualmente buena (r^2=0.9) pero predice una disminución de los caudales sólidos (por ejemplo para un Ql=8 m^3/s el correspondiente Qs=100 m^3/s). Para los meses de escasas lluvias (figura 9.15) no se encontró una buena correlación entre el caudal líquido y el caudal sólido. Esto puede ser debido al poco arrastre por erosión de la cuenca y los sólidos pueden ser debidos a contribuciones antropogénicas (descargas de aguas residuales domésticas e industriales poco relacionadas con el caudal líquido del río). Sin embargo, estos meses poco contribuyen al volumen sólido total anual y para esos meses secos la consi-

Figura 9.13

Correlación sólido-líquido para período de inicio de lluvias (julio - agosto, río Lerma)

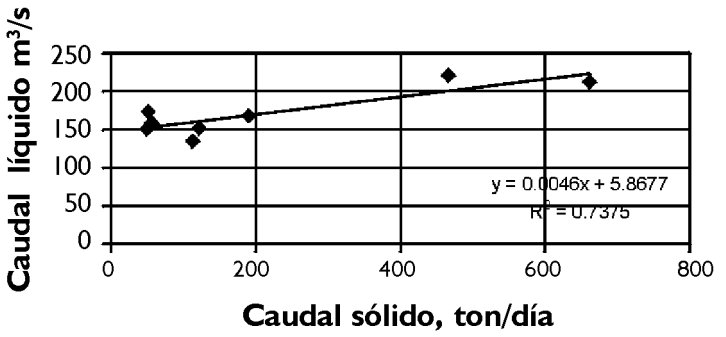
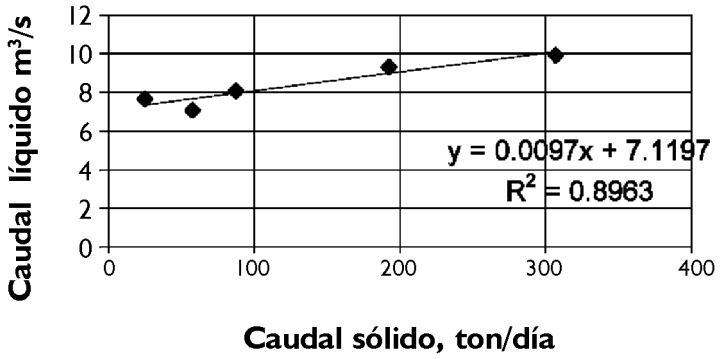


Figura 9.14

Correlación sólido-líquido para período de recesión. Setiembre, río Lerma



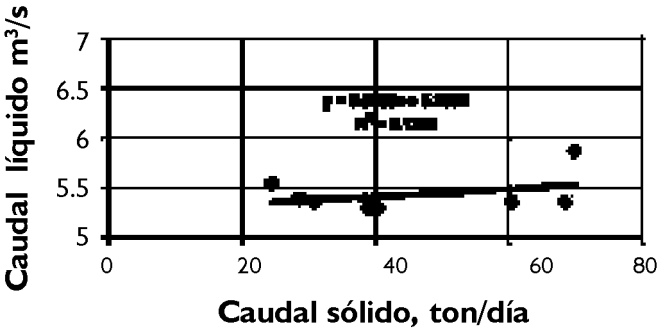
deración de un valor medio de 40 ton/día es razonable y no afecta considerablemente el valor total anual.

Cálculo del aporte medio anual de sólidos al embalse

Las anteriores correlaciones permiten estimar el volumen total anual medio

Figura 9.15

Correlación sólido-líquido para período seco. Abril - mayo, río Lerma



de sólidos al embalse Alzate. Para el efecto se utilizó el caudal líquido medio mensual multianual del río Lerma. Con ese caudal y las correlaciones Ql-Qs se estima el caudal sólido medio mensual. Posteriormente se estima la capacidad de retención de sólidos al embalse por medio de la siguiente relación propuesta por Churchill (1948):

$$Pr = 100 - (800 * Is^{-0.2} - 12)$$

donde

Pr= porcentaje de sedimentos retenidos

Is= índice de sedimentación = Tr/V

Tr= tiempo de retención = Volumen/caudal medio influente

V= Velocidad media del escurrimiento

Para calcular el tiempo de retención se determinó el volumen medio de cada mes y se dividió por el caudal medio de ese mes. La velocidad media se calculó considerando 14 secciones transversales del embalse y promediando la velocidad resultante en éstas para el caudal medio de ese mes.

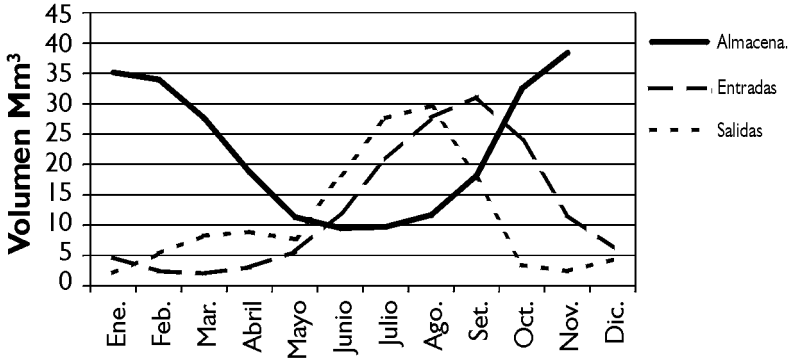
El volumen medio en cada mes se calculó con los datos de operación del embalse desde su construcción hasta 1997. La figura 9.16 presenta esa política de operación.

El cuadro 9.6 presenta los resultados del cálculo del volumen sedimentario promedio anual acumulado en la presa Alzate.

Estimación de la distribución

Figura 9.16

Estadísticas multianuales de operación del embalse J. A. Alzate.



Cuadro 9.6

Cálculo del volumen acumulado de sólidos en el embalse J.A. Alzate.

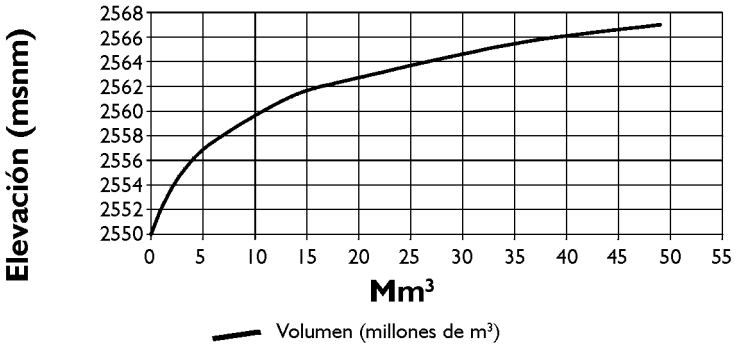
Mes	Caudal líquido	Caudal sólido	Almac. Medio	Tiempo retención	IS=Tr/ Vmed	% retenido	Vol. Sólidos
	m3/s	ton/mes	Mm3	Días			ton/mes
Enero	2.46	1018.34	35.15	165.30	714110118	98.44	1002.43
Febrero	1.36	562.98	33.96	288.36	830479859	98.84	556.45
Marzo	0.84	347.72	27.62	379.28	1092326159	99.54	346.13
abril	1.59	658.95	18.68	136.06	391840481	96.71	637.26
mayo	2.94	1217.04	11.29	44.41	127901963	92.87	1130.27
junio	5.95	1825.56	9.48	18.45	31888304	86.74	1583.56
julio	8.52	17549.51	9.68	13.14	22710363	84.97	14911.83
agosto	10.21	28727.69	11.69	13.25	22893658	85.01	24422.41
Septiembre	12.77	17735.82	18.17	16.46	28443378	86.16	15281.17
octubre	9.46	7350.21	32.51	39.76	68705334	90.34	6640.05
Noviembre	5.32	1825.56	38.43	83.58	722143931	98.47	1797.59
Diciembre	3.59	1217.04	37.01	119.47	688131756	98.34	1196.80
					Total		**69506 ton/año**
							49647 m3/año
					en 37 años		**1 836 942 m³**

de sedimentos en el embalse

En el cuadro anterior se puede observar que durante los meses de mayo-septiembre se acumula el 82% del volumen total anual (57.329 ton. por

Figura 9.17

Capacidad de almacenamiento del embalse J.A. Alzate.



año de un total de 69.506 ton. por año). Durante esos meses el embalse se encuentra en los niveles más bajos con un volumen menor a 20 Mm^3 (ver figura 9.17). En la curva de área vs. elevación (figura 9.20) se comprueba que los niveles para ese volumen son menores a 2652 m.s.n.m.

Para esos niveles el área del embalse es menor de 400 ha tal como puede apreciarse en la gráfica de Elevación vs. Area (figura 9.18).

Por lo tanto, se puede estimar que el espesor medio del depósito sedimentario en las 400 ha por debajo de la cota 2562 m.s.n.m. del embalse es de aproximadamente 40 cm (1.6 Mm^3/400 ha). Se puede suponer que en las zonas más profundas la profundidad del depósito sea mucho mayor (por encima de 1 metro). En efecto, según mediciones puntuales cerca de la cortina las profundidades cuando el embalse se encuentra en el Nivel Normal de Operación (2565.5) no son mayores de 11 m y según la topografía antes de la construcción estas deberían ser cercanas a 15 metros.

Análisis granulométrico de sedimentos superficiales de la presa Alzate

Para llevar a cabo este análisis se seleccionaron 10 zonas de muestreo ubicadas de tal manera que cubrieran la totalidad de la presa, éstas se muestran en la figura 9.19. Se utilizaron mallas de alambre (Tyler o U.S. standard) y para la fracción más fina se usó un hidrómetro Bouyoucus standard tipo 152H

Como ejemplo de la presentación de resultados se presenta el análisis de

Figura 9.18

Curva Area-Elevación del embalse J.A. Alzate

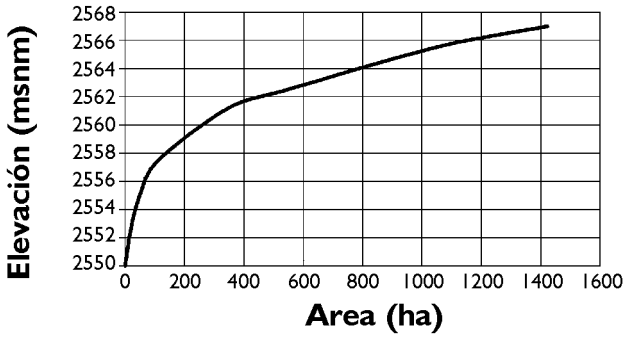
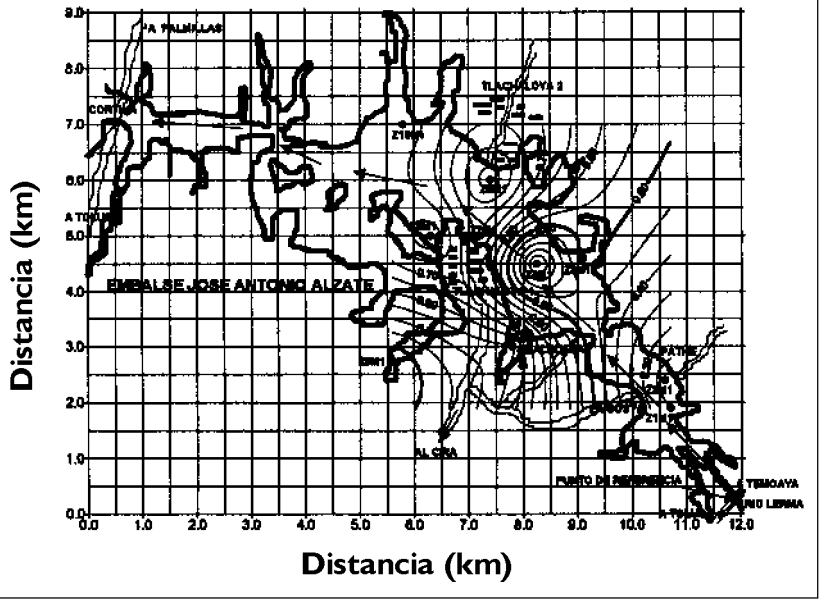


Figura 9.19

Mapa de localización y ubicación de zonas de muestreo



la zona 8 en el cuadro 9.7.

De esa manera se obtuvo una curva de distribución por tamaño para cada una de las zonas. En la figura 9.22 se presentan los resultados de tres zonas (Zona 1, 6 y 10). En éstos se aprecia que el material es predominantemente areno-limoso.

Al graficar curvas de igual diámetro (figura 9.21) se puede apreciar que los materiales mas finos se depositan en la zona 3. Esta zona corresponde al cese de la parte canalizada del cauce del Lerma. La parte del río aguas arriba solo desborda cuando los niveles del embalse son altos (Noviembre-Marzo). En época de lluvias cuando el río aporta la mayor cantidad de sedimentos, el embalse prácticamente empieza en la zona 3 y es ahí donde se depositan la mayor parte de sólidos.

Parámetros descriptivos de la granulometría

Una de las medidas de distribución de tamaños más comúnmente usada es la de Folk y Ward (1957) que hace uso de la escala (phi) de Krumbein

Cuadro 9.7

Análisis granulométrico de sedimento de la zona 4

Malla	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	%Parcial Retenido	% Acumulado que pasa. Muestra menor que la Malla No.4 del 100%	Observaciones
5	4.00	179.5	3.51	96.49	Análisis efectuado
8	2.36	518.25	10.14	86.35	con muestra de
18	1.00	1006.20	19.68	66.67	5111.65 gr. de mate-
20	0.850	166.00	3.25	63.42	rial menor que malla
40	0.425	596.50	11.61	51.82	No.4.
50	0.300	414.60	8.11	43.71	Muestra Z8M3
100	0.150	1177.60	23.04	20.67	
200	0.075	616.20	11.98	8.69	
SUMA		4,674.85	91.36		
CHAROLA		325.15	6.36	15.05	
	suma=	5,000.00	97.72		

Figura 9.20

Distribución del tamaño de los granos y textura de los sedimentos

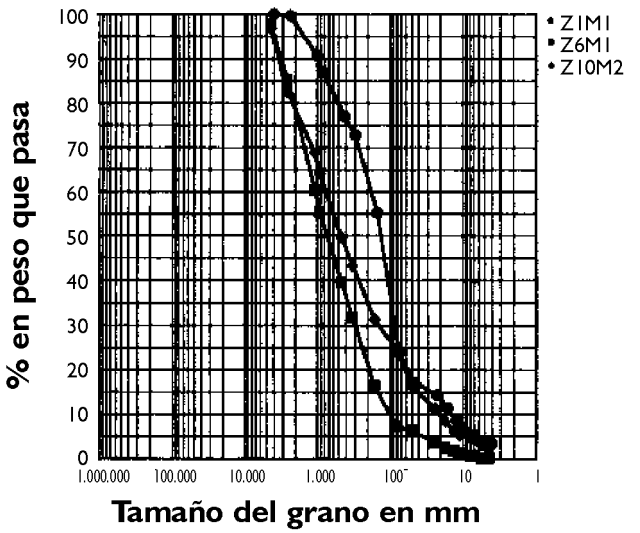
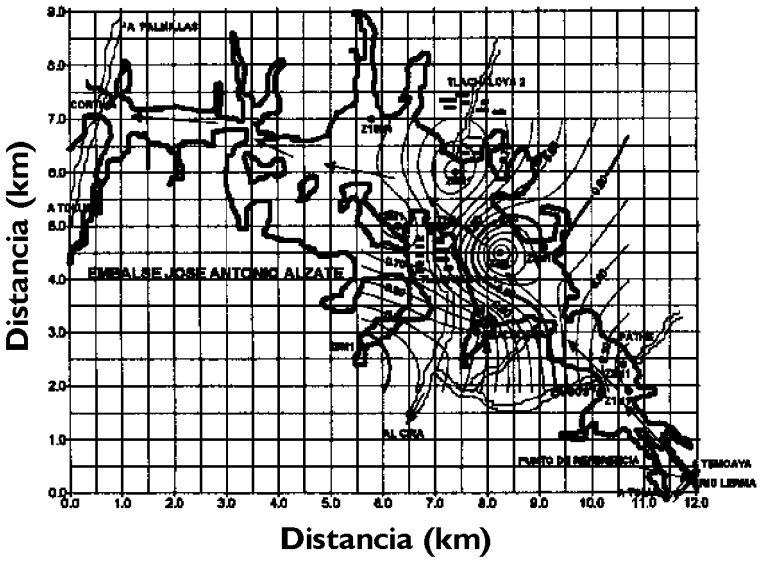


Figura 9.21

Distribución del tamaño de grano en la presa Alzate



(1938) en la que $=\log_2 d$(mm), y $_0$=1 mm.

La *Media* de Folk y Ward, M_z, se define como el promedio de los valores del diámetro, *d*, (o valores phi) en los percentiles 16, 50 y 84, que está afectada por las colas de la curva y es por tanto, una mejor medida de la textura general de la muestra.

$$M_z = \frac{Ø16 + Ø50 + Ø84}{3} \qquad (1)$$

Un resumen sobre las medidas de distribución de tamaños se muestra en el cuadro 9.8. Se incluyen los porcentajes de limo y arcilla obtenidos por el método del hidrómetro.

Análisis de contenido de materia orgánica

Para el análisis de materia orgánica se tomaron 0.2 gr. de cada muestra de material del lecho que pasó la malla 200 (0.062 mm). A esta fracción se le aplicó una modificación del método propuesto por Schollenberger para deter-

minar el contenido de materia orgánica. La materia orgánica se oxida con ácido crómico en presencia de un exceso de ácido sulfúrico. Se agrega una solución de sulfato de plata antes de la digestión para eliminar la presencia de cloruros. Después de efectuada la reacción, el exceso de ácido crómico se titula con una solución ferrosa. Los resultados se reportan en el cuadro 9.9.

La figura 9.22 muestra la distribución espacial de la materia orgánica en la presa. Se observa que la mayor cantidad de materia orgánica se presenta en la zona 3. Esta zona coincide con la mayor presencia de finos. Este hecho puede tener una importante implicación en la presencia de metales pe-

Cuadro 9.8

Datos obtenidos de las muestras del material del lecho del Río Lerma en la Presa Álzate, Tlachaloya, Edo., Méx.

Componentes de tamaño					Parámetros geométricos y Estadísticas de Folk y Ward		
Muestra No.	Grava %	Arena %	Limo %	Arcilla %	M_z mm	M_z	K_G
Z1M1	0.9	74.55	17.82	6.73	0.25	1.82	1.0
Z1M2	16.0	78.5	4.40	1.10	0.60	0.77	0.95
Z2M1	0.40	92.0	5.30	2.30	0.22	2.22	1.28
Z2M3	6.3	86.50	6.81	0.39	0.64	0.65	0.92
Z3M1	7.0	86.0	3.00	4.00	0.52	0.93	0.81
Z3M2	8.0	73.7	17.90	0.04	0.26	1.92	0.89
Z4M1	1.78	89.92	4.30	4.00	0.16	2.68	1.10
Z4M3	12.3	70.23	9.47	8.00	0.23	2.09	0.78
Z5M1	32.53	63.32	3.76	0.39	0.59	0.75	0.79
Z5M2	27.51	58.34	8.42	5.73	0.86	0.22	0.72
Z5M3	30.00	65.02	4.59	0.39	0.80	0.32	0.79
Z6M1	20.0	58.34	19.31	2.35	0.76	0.40	0.77
Z6M2	35.02	59.58	3.40	2.00	0.89	0.17	0.84
Z7M3	12.00	80.5	5.90	1.60	0.76	0.40	1.03
Z8M1	0.03	73.97	22.00	4.00	0.23	2.10	1.17
Z8M2	4.00	76.50	15.50	4.00	0.55	0.87	0.70
Z8M3	3.70	81.30	12.00	3.00	0.49	1.04	0.77
Z9M2	8.00	84.80	5.40	1.80	1.03	-0.05	0.96
Z9M3	19.00	70.00	8.00	3.00	1.05	-0.07	0.89
Z10M2	2.40	84.60	10.20	2.80	0.61	0.72	0.80

Cuadro 9.9

Resultados del análisis del carbón orgánico presente en los sedimentos de la presa Álzate.

Muestra	Vol gastado de $K_2Cr_2O_7^{2-}$	% C_{ox}/gr	% C_{org}
Z1M1	5.4	0.53	0.21
Z1M2	7.4	0.31	0.12
Z2M1	7.4	0.31	0.12
Z2M3	9.0	0.13	0.05
Z3M1	8.0	3.22	1.26
Z3M2	8.5	2.91	1.14
Z4M1	8.4	2.98	1.16
Z4M3	8.2	0.38	0.15
Z5M1	8.5	0.34	0.13
Z5M2	9.6	0.18	0.07
Z5M3	8.9	0.28	0.11
Z6M1	9.6	0.18	0.07
Z6M2	10.1	0.11	0.04
Z6M3	5.9	0.70	0.27
Z7M1	7.4	0.43	0.17
Z7M3	9.2	0.19	0.07
Z8M1	9.7	0.12	0.05
Z8M3	9.7	0.12	0.05
Z9M2	8.7	0.26	0.10
Z9M3	7.6	0.41	0.16
Z10M2	8.9	0.23	0.09

sados, algunos de los cuales presentan afinidad por la materia orgánica y por lo tanto con la presencia de material sedimentario fino.

Medición de concentraciones de metales pesados en núcleos de sedimento

Debido a los procesos fisico-químicos de precipitación y sedimentación, algunos de los metales pesados que son introducidos en un sistema acuático son depositados en los sedimentos (Avila-Pérez y Zarazúa-Ortega, 1993; Baruah *et al.*, 1996; Dekov *et al.*, 1997; Rodríguez y Avila-Pérez, 1997). De tal manera, que los sedimentos proveen información muy valiosa de la historia de la calidad del cuerpo de agua (Baryshev *et al.*, 1995; Von Gunten

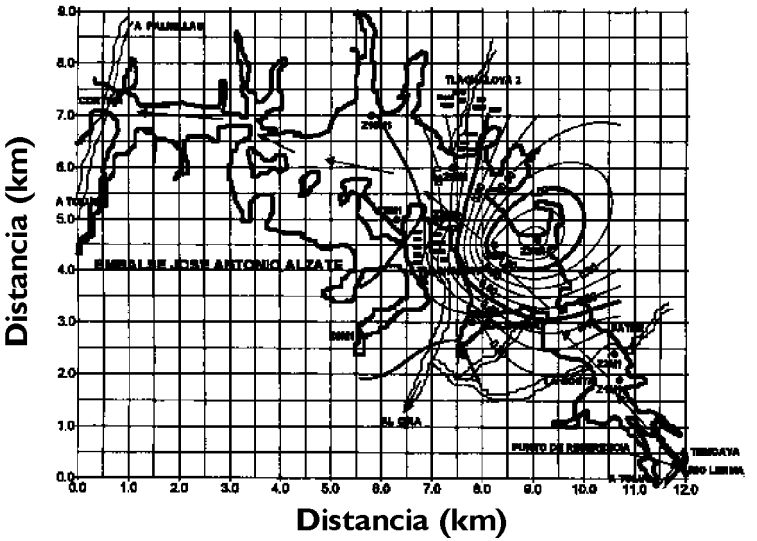
et al., 1997). El análisis de metales pesados de núcleos de sedimento combinado con otras mediciones han sido usados para interpretar la historia de la contaminación en cuerpos de agua (Croudace and Cundy, 1995). El aumento en las concentraciones de Cu, Zn y Cd ha estado asociado al crecimiento de la producción industrial metal-mecánica, metalúrgica y extractiva, mientras que el plomo puede asociarse al aumento de combustibles con este metal (Von Gunten *et al.*, 1997), pigmentos, esmaltes, industria metal-mecánica, industria cerámica, industria odontológica, etc.

La presencia de algunos metales pesados puede ser un indicador de ciertas actividades industriales que hayan provocado el aumento en sus niveles dentro de los sedimentos, sin embargo, es necesario considerar que los sedimentos del embalse Alzate se forman con una contribución importante de suelos de origen volcánico y lacustre que pueden contribuir significativamente con los niveles de ciertos elementos y no deberse exclusivamente a la contaminación provocada por el crecimiento industrial.

En el valle se identifican sedimentos lacustres y aluviales intercalados con materiales clásticos de origen volcánico que se formaron a partir del

Figura 9.22

Distribución espacial de la materia orgánica en la presa



"Eje Neovolcánico Transmexicano" (Deman *et al.*, 1978), ya que la cuenca está constituida por una franja de naturaleza volcánica de tipo calcoalcalino. La secuencia litológica está constituida por diversos tipos de rocas volcánicas del Terciario, fundamentalmente basaltos y andesitas, así como materiales piroclásticos y brechas, los cuales afloran en las sierras que rodean el valle.

Los materiales sedimentarios lacustres están constituidos por arenas de grano fino a grueso con cantidades significativas de limos claros y arcillas oscuras de espesor variable que tienden a concentrarse en sitios específicos dentro de la presa. Las capas oscuras contienen minerales arcillosos y materia orgánica particulada que produce el color oscuro. Las capas de grano fino también contienen calcita. La secuencia de gradación es normal, disminuyendo el tamaño del grano hacia arriba a la base del lecho. El espesor variable de las capas finas se debe a que el material en suspensión a la entrada es diferente durante el año (Reyes *et al.*, 1999).

Con respecto a los contaminantes inorgánicos en la presa Alzate, particularmente los metales pesados, se han determinado niveles altos de Cr, Fe, Pb, Cu, Zn y Cd en fase acuosa (Avila, 1995) y en sedimentos (Barceló, et al, 1996).

Estudios realizados

Se determinaron las concentraciones de K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Pb, Rb, Sr y Zr en núcleos de sedimento a través de la técnica de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X Dispersiva en Energía (EDXRF) en las zonas B, C y F ubicadas a lo largo de la presa Alzate. La evaluación de los espectros se realizó con el programa AXIL y la concentración de cada elemento se determinó mediante el programa SAX, utilizando el estándar de referencia "Soil-7" del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Muestreo de sedimentos

Se realizaron dos muestreos en los meses de abril y mayo de 1999, en el que se obtuvieron dos núcleos en la zona F, cuatro núcleos de la zona C frente al embarcadero de Tlachaloya, donde tres de ellos se colectaron con el nucleador y otro con espátula en un perfil a la orilla del río hasta una profundidad de 84 cm. También se recolectaron dos núcleos en la zona B, a 150 m de distancia del río y retirado del área de maniobras para desazolve. El cuadro 9.10, muestra la relación de núcleos obtenidos en cada zona de la Presa J. A. Alzate en los dos periodos de muestreo.

Análisis de metales en sedimentos

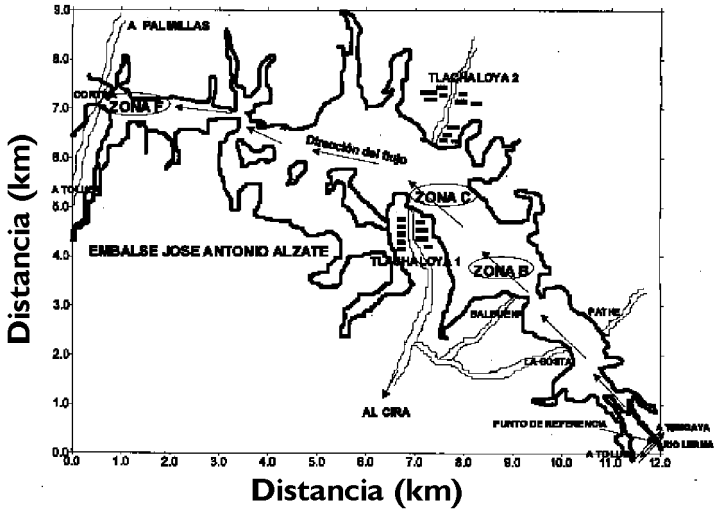
Cuadro 9.10.
Núcleos obtenidos en las diferentes zonas de la presa J.A. Alzate en abril y mayo de 1999.

Zonas de muestreo		
Zona B	Zona C	Zona F
1 y 2	1, 2, 3 y perfil	1 y 2

El análisis de sedimentos se realizó por la técnica de EDXRF. El equipo utilizado consiste en: un detector de Si-Li marca KEVEX, con voltaje de operación de 900 V y resolución de 185 eV a 5.9 KeV; un amplificador Ortec Modelo 572; un multicanal Norland Modelo 5400 y una Computadora HP-Vectra 486 con coprocesador integrado. Como fuentes de excitación se utilizaron tres fuentes radiactivas, la primera de ^{55}Fe, para el análisis de Si, S, K y Ca, ^{238}Pu para analizar K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn y Ga y ^{109}Cd se empleó para analizar Rb, Sr y Zr.

Cada muestra se analizó por duplicado, con un tiempo de colección del espectro de 1000 s. Las muestras se cuantificaron mediante el método de comparación de estándar utilizando el método de corrección por compton

Figura 9.23
Ubicación de las zonas B, C y F en la presa J. A. Alzate.



Cuadro 9.11

Concentración de metales pesados en los núcleos de sedimentos del lecho de la presa Alzate.

ZONA A NUCLEO 2

	CONCENTRACION-ppm												
PROF.	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
7	3829,4	6565,6	5021,2	493,8	38785,8	16,3	21,6	120,8	22,2	17,9	69,2	496,9	245,3
12	4729	7190	4896,4	455,9	37112,5	16,6	24,8	159,8	19,8	24,4	72,9	210,6	204,2
17	3952,8	5366,7	4765	365,1	35390	22,2	23,5	132	24,7	25	98,2	166,9	208,9
22	3994	4052,4	5091,2	245,3	38759,3	18,6	27	142	24	20,2	5,1	139,3	236
27	3567,3	5788,2	5192	243,2	355,6	23,7	32,5	144,6	22,1	22,4	122,3	200,9	217,6
32	4081,3	11370,4	6063,5	365,6	35574,2	18,3	16,4	109	23,5	12,3	13,7	350,7	258,2
37	3844,9	7648,9	5951,8	375,7	37209	19	22,2	119,4	22,3	16,5	69,2	251,3	224,2
PROM.	3999,81	6854,6	5283,01	363,51	31883,77	19,24	24	132,51	22,66	19,814	64,37	259,51	227,77

ZONA B NUCLEO 3

	CONCENTRACION - ppm												
PROF.	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
5	3300	10312	6175,2	636,3	39794,1	14,4	13,1	99	17,8	11,2	58	316	261
10	3886	8769,7	5362,8	527,6	36672,7	15,3	25	124,7	21	19,8	98	275,6	240,2
15	3541,6	514,5	5597,1	612	39580,2	14	21,5	132,3	22,4	21,1	94,9	227,8	261,7
20	3887,6	7131	4047,2	572,8	33494,9	15,2	20	96,7	21,6	17,1	41,4	256,8	212
25	4492,5	10355,5	6175,2	509,7	38569,5	6,2	13,6	88,3	21,1	11,6	139,3	318,4	244,6
30	3762,6	10131	6545,3	424,2	38475,4	18,1	14,8	110	23	10,6	82	322,6	288,1
35	3798,6	7652	6168,6	441,6	40001,2	19,2	24,4	150,1	24,3	18,5	87,9	233,4	245,3
40	4050	66,31	4476	404	34628	14	42	230	14	26	63,8	207,6	237,7
45	4266,4	10465	5314,6	376,2	34644,7	19,7	26,5	145,8	21	19,5	58	351,4	232,4
50	4456,5	11279,8	6234,3	522,3	37979,6	13,7	14,6	94,5	23,2	11,1	128	386	271
55	4328	11966,7	6630,7	617,8	38791,5	17,8	17,2	95	23,1	14,3	91,6	376,4	249,9
60	4657	17523,8	8638,7	687	42148,3	20,2	15,6	98,3	25,3	11,1	29	476,5	196,5
65	4251	10312	6396,4	636,8	41238,8	17,4	24,5	119,3	22,7	16,9	56,3	320,2	238,9
71	4307,5	9540,9	5386,9	579,3	37622,6	17,1	18,7	112,2	27,3	19,1	64,6	288	261,6
5	4029,9	9918,6	5908	573	37953,7	18,1	35,8	195	18,6	24	84,1	316,8	256,6
84	3927,1	9063,2	5146	545,5	38964,8	20,4	24,8	121,2	23,8	17,7	95,3	287,3	249,9
PROM.	4058,89	9062,63	5887,69	541,63	38160	16,3	22,01	125,78	21,89	16,85	79,51	310,05	246,71

ZONA F NUCLEO 1

	CONCENTRACION - ppm												
PROF.	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Ga	Pb	Rb	Sr	Zr
5	2517,2	3666	4613,5	338,8	41235,2	17,3	27,6	126,3	24	22,7	56,30	144,90	213,30
10	3629	4829,75	4416,8	411	36547,8	16	21,4	102,6	26,8	16,9	79,60	146,30	217,30
15	3598,1	4014,9	4084,4	357,7	38642,1	18,34	22,4	104,2	26,3	17,9	72,90	120,00	215,60
20	3618,7	5001,5	4263,1	389,4	34934,8	12,4	21,6	108,7	23,7	18,4	33,5	105,2	113,2
24	2780,8	4033,6	4440,9	366,1	37638,2	13,8	22,8	124,7	21,6	18,4	5,50	134,40	214,90
30	3171,5	4036,8	4644,5	336,6	40969,8	19,5	23,6	114,6	25	19,7	88,30	116,30	220,70
35	2724,3	3218,8	4819,7	401	43622,7	19,1	24,5	121,5	25,1	21,5	69,20	103,80	221,30
40	2739,7	3359,3	4362	365,6	36405,7	12,9	17,9	100,2	19,7	14,4	79,10	91,00	232,60
45	2436,4	3459,2	4754	396,2	44695,6	21,9	26,4	135,1	24,6	17	64,20	363,20	248,40
PROM.	3023,97	3957,76	4488,77	373,60	39410,21	16,80	23,13	115,32	24,09	18,54	60,96	147,23	210,81

Cuadro 9.12

Valores promedio de metales en la litosfera y en los suelos, criterio de la EPA para la disposición en suelos de sedimentos dragados y contenido de metales en la presa Alzate.

Elemento	Valor promedio Litosfera (mg/Kg)	Contenido en el suelo (mg/Kg)	Limites para disposición sedimentos dragados (mg/Kg) EPA Env. Canadá	Contenido en sedimentos del lecho de la presa Alzate (mg/Kg)
				2436-4729
Calcio				3219-17524
Titanio	4 400	101010 000		4084-8639
Manganeso	1000	200-3000	>500	243-687
Hierro	50 000	10 000-300 000	>25 000 >10000	33495-44696
Níquel	100	10-1000	>50 >25	12-24
Cobre	70	2-100	>50 >25	13-36
Zinc	80	10-300	>200 >100	88-195
Galio		0.1-10		14-27
Plomo	10	2-200	>60 >50	10-26
Rubidio				29-139
Estroncio				91-497
Circonio		1-300		183-288

para corregir los efectos de matriz.

Se determinaron las concentraciones de cada elemento en tres núcleos identificados como B, C y F a profundidades de 37, 84 y 45 cm con incrementos de 7, 5 y 5 cm respectivamente a partir de la superficie del lecho.

Las concentraciones medidas de los elementos analizados en los núcleos de sedimentos se presentan en el cuadro 9.11. Los elementos se agruparon de acuerdo al sitio o zona de muestreo y al número de núcleo que corresponden.

Factores de Enriquecimiento.

Con objeto de determinar el componente natural y antropogénico de los elementos en los sedimentos de la presa J. A. Alzate, se determinaron los factores de enriquecimiento. El cálculo de los factores se llevó a cabo mediante la ecuación:

F.E. = (C.X. muestra C.R. muestra) (A.X.S. A.R.S.)

Donde:

C.A. muestra = Concentración del elemento X en la muestra.

C.R. muestra = Concentración del elemento de referencia en la muestra.

A.X.S. = Abundancia del elemento X en sedimentos derivados de rocas ígneas.

A.R.S. = Abundancia del elemento de referencia en sedimentos derivados de rocas ígneas.

Los resultados obtenidos de los cálculos de los factores de enriquecimiento son mostrados en los cuadros 9.13 y 9.14.

Contenido de metales en los núcleos de sedimento

Los sedimentos son transportadores y fuentes potenciales de contaminantes en sistemas acuáticos, estos materiales también pueden afectar la calidad del agua subterránea y los productos agrícolas cuando se depositan en los terrenos aledaños, por los trabajos de desazolve en el trayecto de los cuerpos de agua. Los contaminantes no necesariamente se fijan en los sedimentos sino

Cuadro 9.13

Factores de enriquecimiento para los diferentes elementos en los sedimentos de la presa J. A. Alzate.

Elemento	Núcleo F	Núcleo B	Núcleo C	Promedio
K	0.148	0.209	0.205	0.187
Ca	0.138	0.256	0.360	0.251
Ti	1.317	1.626	1.753	1.565
Mn	0.499	0.518	0.747	0.588
Fe	1.000	1.000	1.000	1.000
Ni	0.284	0.347	0.284	0.305
Cu	0.533	0.591	0.524	0.549
Zn	2.090	2.564	2.355	2.336
Ga	2.038	2.050	1.913	2.000
Pb	1.806	2.063	1.703	1.857
Rb	1.029	1.280	1.157	1.155
Sr	0.420	0.784	1.083	0.762
Zr	1.676	1.870	1.959	1.835

Cuadro 9.14

Factores de enriquecimiento máximo para algunos metales pesados en el sedimento de la presa J. A. Alzate.

Elemento	Núcleo F	Núcleo B	Núcleo C
K	——-	——-	——-
Ca	——-	——-	——-
Ti	——-	1.937	2.329
Mn	——-	——-	——-
Fe	——-	——-	——-
Ni	——-	——-	——-
Cu	——-	0.831	1.103
Zn	2.159	3.076	4.740
Ga	——-	——-	——-
Pb	2.117	2.717	2.888
Rb	——-	1.911	2.006
Sr	——	——	1.507
Zr	——-	2.199	——-

que pueden ser absorbidos por microorganismos o resuspenderse hacia la columna de agua. El aumento de la contaminación de la columna de agua se refleja por el aumento de la contaminación del sedimento.

La composición química de los sedimentos, al menos hasta la profundidad que se muestreó, no presenta grandes diferencias en la concentración de cada elemento analizado, ya que los valores se encuentran dentro del mismo orden de magnitud para cada elemento específico. Sin embargo en cada zona se detecta una variación de las concentraciones con la profundidad. Los picos encontrados difieren en profundidad para cada zona pero presentan un mismo patrón lo que indica para algunos metales como Cu, Pb y Zn que hay una contribución de origen antropogénico. En la sección de datación se tratará de dar una explicación a esas variaciones con respecto al desarrollo de la cuenca.

En general, los valores de níquel, cobre, zinc y plomo en los sedimentos de la presa no superan en promedio los niveles indicados por la EPA (1975) para la disposición en suelos de sedimentos dragados, aunque algunos picos, especialmente en Cu y Zn, superan el criterio utilizado por la agencia ambiental del Canadá, Kuntz (1988). Los valores que se determinaron para el Fe se pueden considerar altos ya que estas concentraciones superan el

límite máximo considerado por la EPA para la disposición de sedimentos dragados en suelos. Sin embargo, las concentraciones promedio encontradas en los sedimentos se encuentran dentro de los valores promedio normales de sedimentos de origen lacustre y de rocas ígneas (Mason y Moore, 1982).

Las concentraciones de los metales en los núcleos de sedimento de la presa Alzate se presentan en el siguiente orden: Fe> Ca> Ti> K> Mn> Sr> Zr> Zn> Rb> Ga> Cu> Pb> Ni. De los resultados se puede observar que sólo el hierro supera el límite para la disposición en suelos de sedimentos dragados marcado por la EPA (1975).

Cabe mencionar que los núcleos de sedimentos se obtuvieron en sitios ubicados aguas abajo de fuentes municipales e industriales así como de importantes fuentes con actividad agrícola que contribuyen al aporte de metales pesados a la presa Alzate. Sin embargo, de acuerdo con los factores de enriquecimiento, la contribución de estas fuentes, en el caso de la mayoría de los metales, es poco significativa en relación con el aporte de las fuentes naturales. No es así para algunos metales como Pb y Zn, tal como se mostrará al calcular los factores de enriquecimiento.

Los resultados de los factores de enriquecimiento (Cuadros 9.13 y 9.14), muestran que para la mayoría de los elementos la principal fuente de incorporación de metales a los sedimentos de la presa J. A. Alzate es la natural, debido a que la mayoría de los elementos presentaron bajos factores promedio de enriquecimiento. Los elementos que presentaron los mayores valores promedio fueron: Zn = 2.336, Ga = 2.000, Pb = 1.857, Zr = 1.835 y Ti = 1.565 (Cuadro 9.4) y de manera individual fueron: Zn = 4.740 y 3.076, Pb = 2.717 y 2.888 y Ti = 2.329 (Cuadro 9.5). Lo anterior implica que muy probablemente para el caso de los metales Zn, Pb y Ti, existe alguna contribución por fuentes antropogénicas hacia la presa.

Los datos se evaluaron en términos de caracterizar ciertos litotipos, por un lado y la fuente de origen de los metales por otro, poniendo atención a varios elementos o grupos de elementos. Todas las curvas parecen tener básicamente el mismo comportamiento para todos los elementos analizados. Las concentraciones de los metales presentan una amplia variabilidad, son menores en la superficie y presentan picos a las profundidades de 10, 30 y 60 cm con tendencia a disminuir nuevamente a profundidades mayores, probablemente debido a cambios en la contribución de contaminantes en los periodos a los que corresponden los sedimentos. Existen fuertes gradientes para la mayoría de los elementos excepto para el Ti, Fe, Rb y Sr. También se observa que el núcleo C presenta mayores concentraciones que los núcleos B y F para el K, Ca, Ti, Mn, Sr y Zr, lo que indica que la zona C es

un sitio significativo de acumulación de metales asociado con la deposición de sedimentos de grano fino y materia orgánica.

Las arcillas presentes en la superficie del lecho tienden a regular los efectos de acidificación por enlace con el H^+, dando como resultado pH acuosos significativamente altos. Las crecientes concentraciones en los primeros 80 cm, probablemente se deban a un aumento de lixiviados, descomposición y oxidación de materia orgánica. De acuerdo con los cuadros 9.11, 9.13 y 9.14, se considera que especialmente para el Ti, Fe, Zn, Ga y Pb, existen otras fuentes no naturales que juega un papel importante en la carga de metales a la presa: la contaminación difusa de origen antropogénico (lluvia, erosión superficial y la contaminación residual de descarga de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales).

El grupo de metales alcalinos y alcalino-térreos K, Rb, Ca y Sr, respectivamente, presentan un comportamiento muy similar en perfil. Aunque el K^+ es monovalente, su concentración en las soluciones de suelo es baja en relación con el K^+ intercambiable, debido a la fuerte adsorción de K^+ que tienen muchos minerales de silicatos laminares. Las fluctuaciones en el contenido de K^+ en las muestras de los núcleos analizados son variables y sus concentraciones se encuentran en el rango de 2500 a 4800 mg/Kg. Parte del potasio entra al sistema como fertilizante por el uso agrícola. Se observa que los sedimentos en la parte superior del lecho presentan alta capacidad de adsorción y de intercambio catiónico, debido a que el contenido de potasio disminuye con la profundidad. Esto indica que el potasio está ligado a los sedimentos de grano fino en la parte superior del lecho. Es probable que parte de la concentración de potasio se deba al aporte de abonos y fertilizantes de los campos de cultivo hacia el sistema.

El Ca presenta su máxima concentración en la parte más superficial de la muestra hasta los 20 cm y tiende a disminuir con la profundidad. El alto contenido de Ca^{+2} indica un pH casi neutro. El Ca tiene importancia como catión intercambiable. La variación del contenido de Ca sugiere que los carbonatos (calcitas) se forman principalmente en el ambiente por la producción orgánica más que por la formación diagenética. El perfil de concentraciones muestra variabilidad con concentraciones altas a los 25, 60 y 20 cm de profundidad en los núcleos B, C y F, respectivamente, y es uniforme debajo de estas profundidades. El Sr es químicamente similar al Ca y es intercambiado de la misma manera que el calcio siguiendo la misma ruta que este. El Sr tiende a concentrarse a los 15 y 35 cm de profundidad.

El Rb presenta valores máximos de 80 y 88 mg/Kg a las profundidades de 10 y 35 cm en el núcleo F, de 98 y 122 mg/Kg a las profundidades de 17 y 27 cm en el núcleo 2, y de 139, 128 y 95 mg/Kg a las profundidades

de 25, 50 y 84 cm de profundidad en el núcleo 3.

Otro grupo lo forman el Fe y Ti. Se observa que el Fe y Ti, aunque son muy variables presentan un comportamiento similar, con un mínimo a los 15 cm y un máximo a los 35 cm, es decir, que cuando la tendencia del hierro es a disminuir, de la misma forma lo hace el Ti. Existe una correspondencia en la relación Ti/Fe. Se mantiene una proporción menor de Ti con respecto al Fe. La razón Ti/Fe es de 0.1 a 0.14 para los tres núcleos. Este comportamiento muestra que cuando hay una disminución en el contenido de Fe, también la hay para el Ti. Las altas concentraciones de Ti pueden correlacionarse con la composición de los basaltos o riolitas, provenientes de las sierras aledañas.

Las concentraciones de manganeso se encuentran en el rango de 250 a 500 mg/Kg, de 450 a 650 mg/Kg y de 350 a 450 mg/Kg en los núcleos B, C y F respectivamente. El manganeso es excesivamente insoluble y su solubilidad se incrementa cuando aumenta la acidez y las condiciones reductoras, pero como los valores de pH reportados en la columna de agua y en los sedimentos son básicos, entonces, encontraremos al Mn en forma de precipitados, probablemente ligados a la estructura de los carbonatos (Rodríguez y Avila-Pérez, 1997). La concentración del Mn es alta en la parte más superficial del sedimento al parecer debido a un aumento en el pH y contenido de materia orgánica presentes en la interfase sedimento-agua.

Se observa un comportamiento muy uniforme en los valores de Ni y Cu para las tres zonas de muestreo, mientras que el Zn presenta valores más variables. El zinc a pesar de su asociación con los silicatos, posiblemente se concentra en los minerales pesados. Es un elemento asociado con sulfatos y sulfuros. El níquel es ampliamente usado en la industria. Sin embargo, las altas concentraciones de Zn sugieren que se deben principalmente a la corrosión de partes de hierro galvanizado, tuberías de agua, placas metálicas y por la descomposición de llantas. Todas estas fuentes corresponden a descargas difusas.

El Zr debido principalmente a su asociación con los silicatos en general (arcillas), y de acuerdo con los valores máximos que presenta, puede correlacionarse con la presencia de materiales de grano fino a las profundidades de 10, 25, 35 y 80 cm en los núcleos B y F.

El Ga al igual que el Rb, está correlacionado estrechamente con minerales arcillosos ricos en aluminio y potasio. El Pb es un elemento que geológicamente puede estar asociado con las fases de sulfuros. Aunque las concentraciones de Pb en los tres núcleos nunca superan el límite marcado por la EPA para la disposición de sedimentos dragados, es probable que exista un aporte de contaminación mínimo de fuentes puntuales y difusas a la pre-

sa, esto es vista de la variación de concentraciones con la profundidad. De acuerdo con Barceló *et al.*, (1998), el Pb en agua es significativamente alto, mientras que en sedimento no se considera así, lo que hace suponer que se mantiene en suspensión ligado a materia orgánica y/o minerales en suspensión.

Conclusiones

La problemática de contaminación de la presa Alzate posee varias facetas, contaminación de origen orgánico, inorgánico y bacteriológico entre otros. Cada una de éstas es grave en la presa y requiere de estudios profundos. En este trabajo se hizo énfasis en la contaminación por metales pesados y por lo tanto no se pretende aquí efectuar un diagnóstico completo de la salud de este cuerpo de agua. Con respecto a esta problemática de contaminación por metales pesados se puede concluir lo siguiente:

1. Las concentraciones encontradas para la mayoría de los metales no indican un alto grado de toxicidad de los sedimentos por la presencia de metales pesados.
2. Algunos metales como el Pb,Zn y Cu presentan concentraciones, factores de enriquecimiento y características de deposición tales que permiten afirmar una alta proporción de contribución de origen antropogénico.
3. Las concentraciones de Zn y Cu particularmente sobrepasan los criterios utilizados por la agencia del medio Ambiente del Canadá para caracterizar sedimentos riesgosos para dragado.
4. El Pb, aunque no presenta concentraciones muy altas en los sedimentos, ha demostrado ser muy afín a la materia fina en suspensión y a la materia orgánica. Por ello hay que monitorear su presencia en la fase acuosa.
5. La forma de operación del embalse permite la exposición de sedimentos en época de lluvias lo cual facilita la resuspensión de sedimentos contaminados por metales e incluso el arrastre. Hay indicaciones en este estudio de que la zona del embalse cercana a la cortina se está viendo más afectada que las otras en periodos recientes. En este estudio se demuestra que la zona C es la que presenta mayor cantidad de materia fina y orgánica por lo cual constituye una fuente potencial de contaminantes afines a la materia suspensión.
6. El volumen influente de sedimentos es importante durante los meses de julio y agosto. Durante esa época se envía mucho agua para irrigación en el Bajío. En vista de que la movilidad de la mayor parte de los metales estudiados tiene que ver con la dinámica de los sedimentos, se deben

tomar precauciones con respecto a la calidad de agua suministrada.

7. El modo de operación del embalse no contribuye en la problemática de calidad de agua del embalse. Niveles superiores durante la época de lluvia (Julio-Octubre) permitirían una mayor capacidad de retención de sólidos y evitarían la resuspensión de sedimentos contaminados. Esto se aprecia especialmente en la zona C, la cual presenta la mayor porción de finos y materia orgánica y en la cual los sedimentos se encuentran completamente expuestos durante los meses de Junio a Octubre
8. La problemática de la presa es consecuencia de las débiles acciones de saneamiento de los ríos influentes. El río Lerma que aporta el 79% del caudal influente total presenta valores de oxígeno disuelto nulos desde Enero a Junio en el tramo corredor industrial a la presa Alzate. En época de estiaje la totalidad del caudal del río Lerma proviene de aguas residuales. El estudio de caudales mínimos muestra que la media diaria de período de retorno de 2 años es 0.62 m^3/s y la media en 7 días sólo aumenta 0.68 m^3/s. De estos caudales solo se trata menos del 50%, lo cual impide la labor autodepuradora del río Lerma. El río Tejalpa presenta picos de caudal pronunciados durante la época de lluvias (máximo aforado 59 m^3/s) y por lo tanto contribuye de manera importante en el aporte de sólidos al embalse. Se recomienda efectuar acciones de prevención de la erosión en su cuenca.

Estudios futuros recomendados

Los valores encontrados en este estudio para metales en sedimentos permiten prever que algunos metales de origen antropogénico como el Cu, Zn y Pb pueden encontrarse en la fase acuosa. Se recomienda efectuar muestreos sistemáticos y análisis de metales en la columna de agua de la presa Alzate.

Los contaminantes de origen orgánico y bacteriológico presentan una problemática aguda en la presa Alzate. Esa problemática tiene variaciones estacionales que coinciden con los periodos de uso del agua para irrigación. Se hace absolutamente necesario la ralización de un análisis profundo de las concentraciones presentes de ese tipo de contaminantes, así como su variación estacional.

Es posible modificar el modo de operación del embalse. Para definir su nueva modalidad es necesario efectuar un estudio multiobjetivo de su operación. Se debe analizar la función de control de inundaciones aguas arriba del embalse, la demanda de agua para riego, las limitaciones del cauce del Lerma aguas abajo para prevenir inundaciones y los niveles mínimos reque-

ridos para que el embalse efectúe de manera eficiente su labor depuradora.

Se recomienda efectuar un estudio de erosión de toda la cuenca Alta del río Lerma con el fin de adelantar acciones para prevenir el alto aporte de sólidos al embalse.

En el tramo desde el corredor-industrial hasta la presa Alzate es importante efectuar un estudio de la capacidad de autodepuración del río Lerma. El estudio hidrológico de caudales mínimos presentado en este proyecto demuestra que durante el estiaje el río no posee el caudal suficiente para asimilar el gran volumen de vertidos industriales y domésticos. Es importante definir los valores máximos permitidos para esos vertidos o en su defecto el caudal requerido para que este los asimile eficientemente en cada época del año.

Referencias

1. Rotulada como Región Hidrográfica No. 12 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos,

2. De ellos unos 5 metros cúbicos provenían (y aún provienen) del valle del Alto Lerma.

3. La información fuente corresponde a las curvas de nivel contenidas en la carta Geográfica del Estado de México (IGECEM, 1995).

4. Con ello, se da cumplimiento a los lineamientos establecidos por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) quien cita que para el estudio de variables climatológicas sólo pueden ser consideradas estaciones con al menos diez años de registros.

5. La cartografía se basó en datos de 1963 a 1983.

6. Para el presente estudio se contó con la información hidrométrica de tres estaciones de aforo: la estación la "Y", Trojes y Calixtlahuaca. El período de registros de caudal considerado corresponde al mismo período de datos pluviométricos seleccionado (1974- 1990).

7. Cada muestra de aproximadamente 300 ml se llevó al laboratorio de calidad del agua del CIRA donde por medio del método de evaporación y pesado se determinó la concentración para cada altura medida.