

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos
<i>Autor / Adscripción</i>	Anne M. Hansen Manfred van Afferden Franklin Torres-Bejarano Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 22(4): 87-102
<i>Fecha de publicación</i>	2007
<i>Resumen</i>	Como resultado de escurrimientos urbanos y descargas de aguas residuales, se han acumulado importantes cantidades de sedimentos en el vaso Cencali, situado en el centro de Villahermosa, Tabasco, México. Para determinar la cantidad acumulada de estos sólidos, se realizó una batimetría en cincuenta puntos, encontrando un volumen de sedimentos acumulados de aproximadamente 31 550 m ³ . También se analizaron el uso de suelo y la densidad de población en la cuenca hidrológica del vaso para estimar las aportaciones de sedimentos y contaminantes provenientes de escurrimientos y aguas residuales.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/847

Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos

Anne M. Hansen
Manfred van Afferden
Franklin Torres-Bejarano

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Como resultado de escurrimientos urbanos y descargas de aguas residuales, se han acumulado importantes cantidades de sedimentos en el vaso Cencali, situado en el centro de Villahermosa, Tabasco, México. Para determinar la cantidad acumulada de estos sólidos, se realizó una batimetría en cincuenta puntos, encontrando un volumen de sedimentos acumulados de aproximadamente 31 550 m³. También se analizaron el uso de suelo y la densidad de población en la cuenca hidrológica del vaso para estimar las aportaciones de sedimentos y contaminantes provenientes de escurrimientos y aguas residuales. Se calculó que el vaso recibe aproximadamente 7 000 000 m³/año de agua, 5 200 m³/año de sedimentos, 105 t/año de nitrógeno, 26 t/año de fósforo y 530 t/año de DBO₅. Se evaluó la calidad de los sedimentos en 11 estaciones de muestreo y sobre la base de 742 análisis químicos y microbiológicos individuales. De acuerdo con la calidad química y microbiológica de los sedimentos y aplicando criterios ecológicos internacionales, el vaso Cencali se clasificó como afectado en más de 65% de su vida acuática. Según los criterios de la normatividad mexicana para lodos de plantas de tratamiento, los sedimentos del vaso Cencali pueden ser utilizados en terrenos con fines agrícolas y restauración de suelos. Otro reúso potencial podría ser como material de capas selladas en la construcción de relenos sanitarios.

Palabras clave: escurrimientos urbanos, aguas residuales, calidad de sedimentos.

Introducción

Los principales problemas que pueden sufrir lagos y lagunas localizados dentro o cerca de zonas urbanas son la eutroficación como resultado de la contaminación, el azolve ocasionado casi siempre por un manejo inadecuado de la cuenca urbana y la falta de control de las entradas de aguas residuales.

Pueden mencionarse varios casos en el ámbito internacional, como las lagunas Lo Méndez y Lo Galindo en Chile (Municipalidad Concepción, 2004), el lago Brabrand en Dinamarca (Søndergaard *et al.*, 2000), y el

lago Grosser Mueggelsee en Alemania (Nixdorf *et al.*, 2003), que representan ejemplos del deterioro que sufren estos ecosistemas cuando no se controlan debidamente las entradas de aguas provenientes de distintas fuentes, como las aportaciones de sedimentos provocados por erosión, escurrimientos urbanos derivados de áreas impermeabilizadas debido al revestimiento del suelo (e.g. edificios, calles y avenidas pavimentadas, etcétera), evitando la infiltración directa del agua de lluvia, así como descargas de contaminantes de origen residencial, comercial e industrial. Los contaminantes más comúnmente vertidos son bacterias patógenas,

materia orgánica, nutrientes y metales pesados (EPA, 2000; Nixdorf *et al.*, 2003).

El vaso Cencali en Villahermosa, Tabasco, México, no escapa de esta problemática y se manifiesta en el azolve del vaso con sedimentos. Durante el estiaje se observa un estado de descomposición de materia orgánica y aumento en la producción de biomasa (algas), biogás y lodos flotantes (ilustración 1). Como consecuencia, se tiene la presencia de malos olores en las proximidades del vaso y mortandad de peces, que se han presentado en varias ocasiones, probablemente por la ausencia de oxígeno y/o presencia de sedimentos suspendidos.

En este trabajo se presenta una caracterización de la problemática del vaso Cencali, incluyendo causas y riesgos relacionados con la afectación de agua y sedimentos. Asimismo, se proponen alternativas de reúso de los sedimentos.

Área de estudio

El vaso Cencali se encuentra en el centro de la ciudad de Villahermosa, en el estado de Tabasco, en el sureste de México, y representa la entrada a la laguna de Las Ilusiones (ilustración 2), la cual conforma un extenso sistema lagunar, con un área total de aproximadamente 200 hectáreas.

El vaso tiene un área aproximada de 3.1 ha, con longitud máxima de 520 m en la dirección suroeste-noreste y ancho máximo de 190 m. Las partes más angostas del vaso corresponden a la entrada del Canal de Malda, con 3.8 m, y la salida a la laguna de Las Ilusiones con 9 m de ancho, respectivamente.

Ilustración 1. Presencia de lodos flotantes en el vaso Cencali.



El vaso se encuentra rodeado por hoteles, zonas residenciales y áreas verdes. Capta el agua pluvial de una extensa zona del centro de la ciudad de Villahermosa y recibe importantes volúmenes de agua, que entran por el canal de Malda y a través de colectores de aguas pluviales provenientes de la zona hotelera y áreas residenciales adyacentes (ilustración 2).

Calidad del agua

Los datos de calidad del agua fueron obtenidos por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Protección Ambiental del Estado de Tabasco (SEDESPA 2002) mediante monitoreos en 34 eventos durante el periodo comprendido entre 1995 y 2001. Los resultados que se resumen en el cuadro 1 muestran los parámetros medidos en el vaso Cencali y la frecuencia en la que éstos presentaron valores fuera de los límites que establecen los criterios ecológicos para protección de la vida acuática (DOF, 1989).

Se nota que todas las mediciones de coliformes fecales realizadas en el vaso están por arriba de este criterio (DOF, 1989), sugiriendo que existen descargas de origen doméstico, ya sea por infiltraciones o por descargas directas al vaso.

Se observaron bajos contenidos de oxígeno disuelto y altas concentraciones de sulfuros en el agua del vaso, donde 59 y 100% de las mediciones, respectivamente, no cumplen con los criterios ecológicos (DOF, 1989). Estos valores son indicadores de anoxia, causada por la biodegradación de la materia orgánica aportada al vaso Cencali.

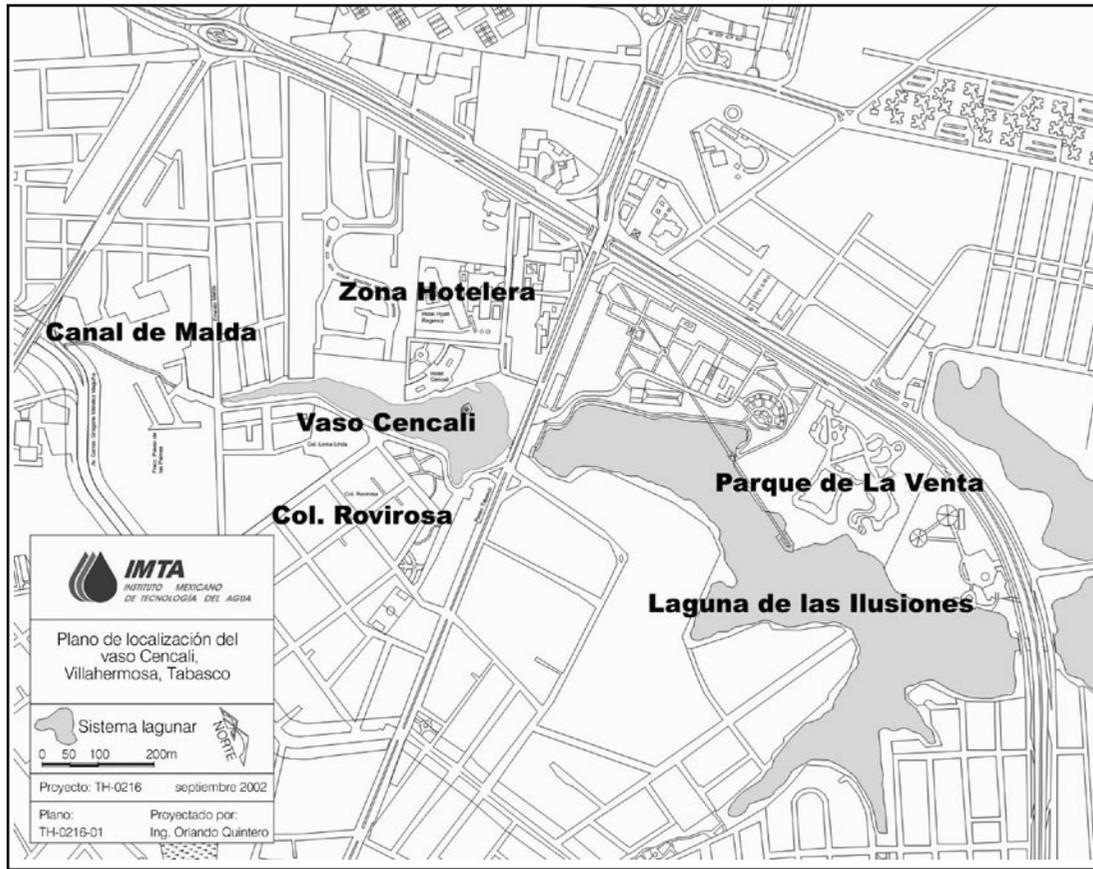
Los elevados valores de fosfatos y de nitrógeno amoniacal indican un severo problema de eutroficación, ya que 93% de los valores medidos para fosfatos y 86% de los registros de nitrógeno amoniacal están por arriba de sus respectivos límites.

Considerando los promedios de las concentraciones de fósforo y aplicando el criterio de Salas y Martino (1996) para la clasificación del estado trófico de cuerpos de agua tropicales, el vaso Cencali se clasifica como hipereutrófico.

En la ilustración 3 se muestran las demandas de oxígeno (a) y la conductividad eléctrica (b) durante el periodo comprendido entre marzo de 1997 y septiembre de 2000.

Se observan oscilaciones anuales en estos parámetros, donde tanto la demanda química de oxígeno (DQO) como la conductividad eléctrica (CE) aumentan apreciablemente durante el estiaje y disminuyen durante los periodos de lluvia.

Ilustración 2. Localización del vaso Cencali.

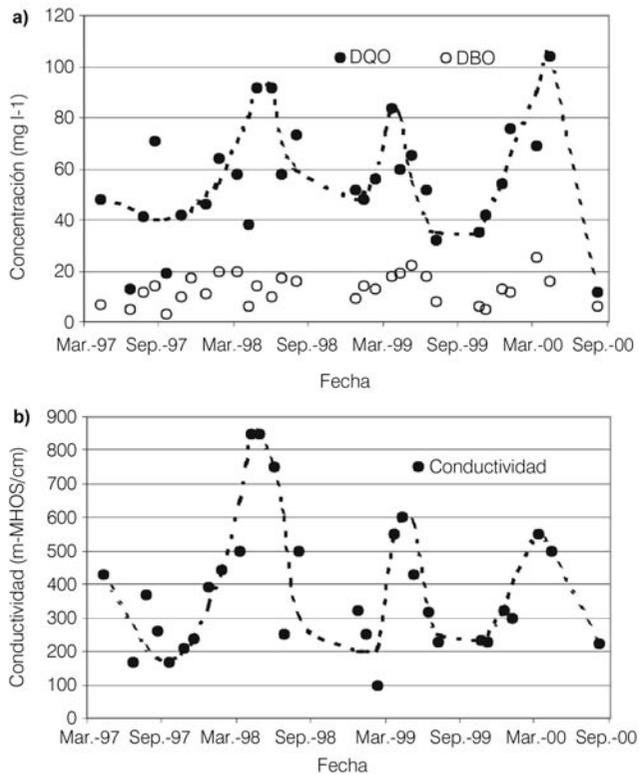


Cuadro 1. Análisis de parámetros medidos en el vaso Cencali (1995-2001).

Parámetro	Unidad	Límite ¹	Mín-Máx	No cumplen (%)
Olor	sí/no	no	no - sí	82
Color (verde)	sí/no	no	no - sí	74
Burbujas	sí/no	no	no - sí	18
Materia flotante	sí/no	no	no - sí	24
Película visible	sí/no	no	no - sí	41
pH	-	6.5-8.5	6.7 - 9.1	24
Sólidos suspendidos totales	mg/l	30	4.0 - 82.0	45
Grasas y aceites	mg/l	10	1.0 - 28.0	10
Sulfuros	mg/l	0.002	0.2 - 1.6	100
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.06	0.02 - 2.2	86
Fosfato	mg/l	0.05	0.01 - 2.7	93
Oxígeno disuelto	mg/l	5	0.0 - 10.0	59
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1 000	2 400 - 1 240 000	100

¹DOF (1989). Protección de la vida acuática.

Ilustración 3. Resultados de monitoreo de calidad del agua en el vaso Cencali: (a) demandas de oxígeno y (b) conductividad eléctrica.



Metodología

Batimetría

Para calcular el volumen de agua y sedimentos acumulados en el vaso Cencali, se realizó una batimetría en cincuenta puntos, en un diseño de malla. Las profundidades se midieron desde una lancha con estatal de 3.5 m de longitud, que se introdujo hasta alcanzar la superficie del sedimento para registrar la profundidad del agua. Posteriormente se enterró el estatal hasta topar con superficie firme, tomándose la profundidad total en ese punto. La profundidad de la capa de sedimentos no consolidados se obtuvo de la diferencia de la profundidad total y la profundidad de la capa de agua en cada punto. Se analizaron los datos usando el programa *Surfer v. 7.02* y el método Kriging de interpolación con malla uniforme de un metro.

Muestreo de sedimentos

Para evaluar la contaminación de los sedimentos, se tomaron muestras en 11 estaciones por muestreo de malla y estratificado (EPA, 2001). De esta manera, en la

parte angosta del vaso se colocaron cuatro estaciones con una distancia de 78 m y siete estaciones en forma de malla (40 x 40 m) en la parte ancha del vaso (ilustración 4). Para fines de control de calidad, se obtuvieron dos muestras duplicadas y, para conocer la calidad del perfil de sedimentos, en dos estaciones se analizaron tanto los sedimentos superficiales (0 - 1 m) como los subsuperficiales (1 - 2 m).

Identificación de parámetros y límites

En México no se han establecido normas que regulen la calidad de sedimentos con base en criterios ecológicos. Por este motivo se usaron aquellos definidos por Canadá y Estados Unidos de América (Ingersoll *et al.*, 2000; CCME, 2002), que establecen diferentes niveles de contaminación en sedimentos. Aquí se consideraron los dos siguientes:

- ISQG (*Interim Freshwater Sediment Quality Guidelines*). Este nivel corresponde a la concentración por debajo de la cual no ocurre frecuentemente (<24%) una afectación adversa a la vida acuática.
- PEL (*Probable Effect Level*). Es la concentración que corresponde a un riesgo de afectación adversa entre 25 y 65%.

Actualmente no existen normas para el reúso de sedimentos provenientes del dragado de cuerpos de agua. Por este motivo, para el reúso de los sedimentos del vaso Cencali se escogieron la norma oficial mexicana para lodos activados y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003) y los criterios de Canadá para suelos contaminados (CCME, 1999).

Análisis químicos y microbiológicos

Selección de métodos analíticos

Se consideraron los niveles más bajos (ISQG) para definir los límites de cuantificación analítica y los respectivos métodos para cada grupo de contaminantes. En el cuadro 2 se presentan los métodos seleccionados.

Muestreo, almacenamiento y preparación de muestras

El muestreo de los sedimentos, su conservación y transporte, se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones establecidas por EPA (2001). Las muestras fueron extraídas utilizando un nucleador manual con tubería de PVC de 2" de diámetro y 3 m de longitud (ilustración

Ilustración 4. Mapa del vaso Cencali y alrededores, con estaciones de muestreo.

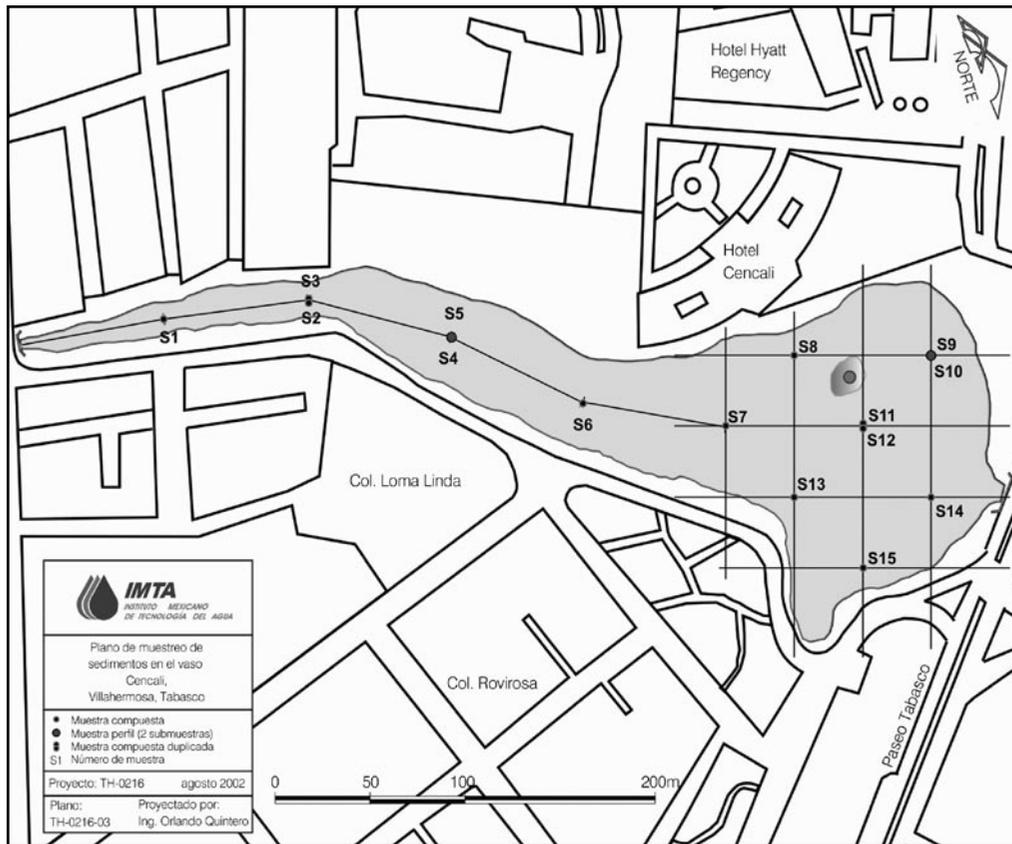


Ilustración 5. Muestreo de sedimentos.



5). Las muestras extraídas fueron homogeneizadas y guardadas en la oscuridad bajo refrigeración a 4.0 °C. Una vez en el laboratorio, se analizaron los parámetros indicados en el cuadro 2.

Análisis del área y población de la cuenca del vaso Cencali

Se realizó el análisis de área y población mediante análisis de la información obtenida a través de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Tabasco (SAPAET, 2002) sobre lavaderos y vasos reguladores existentes en la ciudad de Villahermosa, y de los censos de INEGI correspondientes a 1995 y 2000 (INEGI, 2002a y b). Se estimó el área de la cuenca que corresponde al vaso Cencali, considerando 50% de la distancia entre canales de drenaje, resultando en un área total de 2.9 km².

Estimación de escurrimientos

Los escurrimientos urbanos contienen diferentes contaminantes provenientes del lavado de calles, techos, plantas y suelos. Especialmente los sólidos suspendidos (polvo de las calles, suelo de zonas de erosión, materia orgánica) se sedimentan en vasos receptores y conforman los sedimentos.

Cuadro 2. Métodos analíticos y límites de cuantificación para contaminantes en sedimentos.

Parámetro	Método analítico	Unidad	Guía canadiense para calidad de sedimentos (protección de biota acuática) (CCME 2002)	
			ISQG	PEL
Bifenilos policlorados	EPA 8082B-1990	µg/kg	34.1	277
Hidrocarburos poliaromáticos	EPA-8310-1986 M	µg/kg		
Acenafteno			6.71	88.9
Acenaftileno			5.87	128
Antraceno			46.9	245
Benz(a)antraceno			31.7	385
Benzo(a)pireno			31.9	782
Benzo(b)fluoranteno			s.l.	s.l.
Benzo(ghi)perileno			s.l.	s.l.
Benzo(k)fluoranteno			s.l.	s.l.
Criseno			57.1	862
Dibenz(a,h)antraceno			6.22	135
Fenantreno			41.9	515
Fluoranteno			111	2 355
Fluoreno			21.2	144
Indeno(1,2,3-cd)pireno			s.l.	s.l.
Naftaleno y 2-metilnaftaleno	34.6	391		
Pireno	53	875		
Plaguicidas organoclorados	EPA-8081A-1996 M	µg/kg		
DDD			3.54	8.51
DDE			1.42	6.75
DDT			1.19	4.77
Dieldrin			2.85	6.67
Endrin			2.67	62.4
Metales	EPA-3051			
Digestión de sedimentos				
As	EPA 6010-1996	mg/kg	5.9	17
Ba			s.l.	s.l.
Cd			0.6	3.5
Cr			37.3	90
Cu			35.7	197
Pb			35	91.3
Ni			s.l.	s.l.
Tl			s.l.	s.l.
V			s.l.	s.l.
Zn			123	315
Digestión (muestra Hg)	EPA 3015A-1998			
Hg	EPA 7471-1986		0.17	0.486
Materia orgánica	MSA 92.30	%	s.l.	s.l.
Nitrógeno total Kjeldahl	EPA 351.1	mg/kg	s.l.	s.l.
Fósforo total	NMX-AA-094-1986	mg/kg	s.l.	s.l.
Coliformes fecales	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/10 g	s.l.	s.l.
Huevos de helmintos	NOM-004-SEMARNAT-2002	Org/10 g	s.l.	s.l.
Salmonella	NOM-004-SEMARNAT-2002	NMP/10 g	s.l.	s.l.

s.l. = sin límite.

Mediante aplicación de la siguiente fórmula se estimó el gasto generado por agua de lluvia en la cuenca del vaso Cencali:

$$G = A \times P \times Esc$$

donde:

G = gasto ($m^3/año$).

A = área de la cuenca (m^2).

P = precipitación promedio anual (m^3/m^2).

Esc = factor de escurrimiento.

Los datos hidrológicos usados para el cálculo de las aportaciones de agua provienen de los registros de precipitación en las estaciones Villahermosa Centro I (1926-1974, clave 27055, latitud = 17.98, longitud = 92.92) y Villahermosa Centro II (1948-1997, clave 27054, latitud = 17.98, longitud = 92.95) (CNA, 2002).

Se estimó el factor de escurrimiento suponiendo que 50% de la cuenca está cubierta por áreas selladas (edificios, calles, estacionamientos), con escurrimientos de 100% de la precipitación y 50% por áreas verdes con 50% de infiltración. Bajo estas consideraciones, el factor de infiltración se estima en 0.25 y el de escurrimiento, en 0.75.

Estimación de la carga de contaminantes por aguas residuales

Los problemas del sistema de drenaje de la ciudad de Villahermosa están relacionados principalmente con la insuficiente cobertura en las redes de alcantarillado y que el sistema de drenaje es combinado y recibe tanto aguas residuales como pluviales. Esto resulta en desbordamientos de agua en la época de lluvias. Por

Cuadro 3. Composición del agua residual doméstica en climas húmedos¹.

Parámetro	(mg/l)
Sólidos totales	700
Sólidos disueltos	500
Sólidos suspendidos	200
Nitrógeno (como N)	40
Fósforo (como P)	10
Cloruro	50
Alcalinidad (como $CaCO_3$)	100
Grasas	100
DBO_5	200

¹FAO (2002).

otro lado, los cárcamos de bombeo de aguas residuales no tienen suficiente capacidad, especialmente durante esta temporada.

Para determinar las cantidades de diferentes contaminantes contenidos en el agua residual, se utilizó la información publicada por FAO (2002), correspondiente a la composición de agua residual en climas húmedos (cuadro 3).

Resultados

Área y población de la cuenca del vaso Cencali

La cuenca estimada del vaso Cencali se observa en la ilustración 6, donde además se muestran los vasos reguladores de otras cuencas.

Las áreas correspondientes a las tres principales entradas de escurrimientos urbanos al vaso Cencali, así como las correspondientes a poblaciones, se presentan en el cuadro 4.

De esta manera, las distribuciones de áreas en la cuenca del vaso Cencali son:

Canal de Malda:	76%
Zona Hotelera:	8%
Col. Rovirosa:	16%

Aportación de escurrimientos y aguas residuales

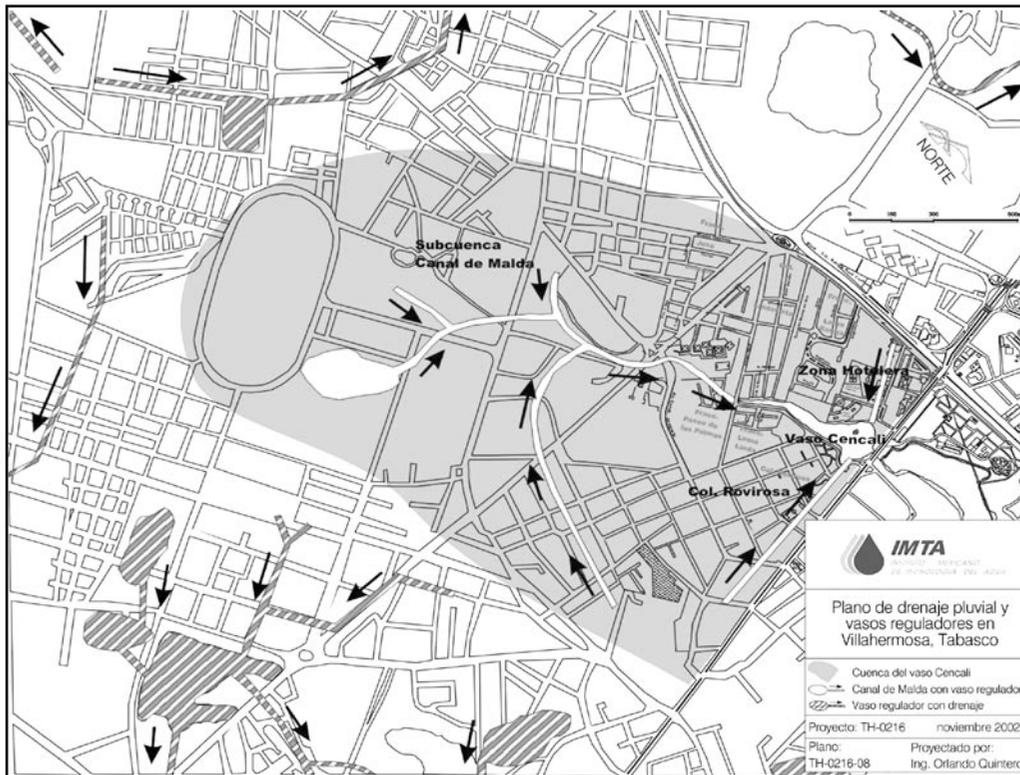
Usando valores publicados por la EPA (1999), se calcularon las concentraciones de diferentes contaminantes en los escurrimientos urbanos, estimando una distribución del área en la cuenca de 80% con uso residencial y 20% como zona comercial. En el cuadro 5 se incluyen las concentraciones resultantes para escurrimientos urbanos de la cuenca del vaso Cencali.

Multiplicando la concentración de sólidos suspendidos en el cuadro 5 con el gasto generado por agua de lluvia, se estimó la cantidad de sedimentos que entra anualmente al vaso Cencali por escurrimientos urbanos (cuadro 6).

Usando los censos INEGI de 1995 (INEGI, 2002a) para estimar la población en las tres subcuencas de afluencia al vaso Cencali y considerando un promedio de 200 mg/l de sólidos suspendidos en el agua residual, así como una aportación de 262.5 l/hab×día (SAHOP, 1979), se estimaron las cantidades de sedimentos provenientes de aguas residuales (cuadro 7).

De acuerdo con estas estimaciones, la potencial cantidad de sedimentos en la cuenca del vaso Cencali es de aproximadamente 5 200 $m^3/año$, correspondiendo aproximadamente 80% a escurrimientos urbanos y 20%

Ilustración 6. Cuenca del vaso Cencali. Las flechas indican la dirección de flujo del agua.



Cuadro 4. Estimación de las áreas de subcuencas correspondientes a las diferentes entradas de escurrimientos urbanos al vaso Cencali.

Fuente de entradas	Colonias y fraccionamientos (% de área cuando es <100)	Población (hab) ¹	Área unitaria (m ²)	Área total (m ²)
Canal de Malda	Linda Vista	2 870	285 268	2 207 946
	Colonia El Águila (66.7)	6 441	541 273	
	José Colomo	1 866	260 046	
	Militar Linda Vista	870	65 619	
	Atasta de Serra (20)	4 703	762 885	
Zona Hotelera	Primero de Mayo (12.5)	1 288	292 855	242 933
	Álvaro Obregón	0	39 357	
Colonia Rovirosa	Loma Linda	600+400 ²	203 576	457 081
	Colonia Rovirosa	2 462	186 444	
	Colonia El Águila (33.3)	3 221	270 637	
Total		24 721	2 907 960	2 907 960

¹ INEGI, 2002a.

² clientes y personal de los hoteles (estimado).

a agua residual (cuadro 8). En el mismo cuadro se observa que esta situación se invierte para nutrientes y DBO₅, ya que el agua residual potencialmente aporta un 90% de las cargas anuales de estos parámetros. Es

importante mencionar que durante 2003, el gobierno del estado de Tabasco realizó obras de reparación de colectores de agua para disminuir las entradas directas de aguas residuales al sistema lagunar.

Cuadro 5. Concentraciones de diferentes contaminantes en agua de escurrimiento urbano¹.

Parámetro	Escorrentamiento residencial (80%) (mg/l)	Escorrentamiento comercial (20%) (mg/l)	Valor estimado para la cuenca del vaso Cencali (80% residencial y 20% comercial) (mg/l)
Sólidos totales	587	285	526.6
Sólidos disueltos (TDS)	117	130	119.6
Sólidos suspendidos	463	256	421.6
Nitrógeno (como N)	1.8	3.63	2.17
Fósforo (como P)	0.41	0.53	0.43
DBO ₅	13	9	12.2
DQO	110	165	121.0
Fosfatos	0.33	0.10	0.28

¹EPA (1999).

Cuadro 6. Estimación de gastos y aportación de sedimentos al vaso Cencali por escurrimientos urbanos.

Fuente de entradas	Gasto (m ³ /año)	Sedimentos secos (t/año)	Sedimentos húmedos ¹ (m ³ /año)	Distribución de sedimentos aportados (%)
Canal de Malda	3 475 859	1 465	3 157	76
Zona Hotelera	382 438	161	347	8
Colonia Rovirosa	719 558	303	654	16
Total	4 577 855	1 929	4 158	100

¹ 53.6% de humedad (cuadro 10).

Cuadro 7. Estimación de gastos y aportación de sedimentos al vaso Cencali por aguas residuales.

Fuente de entradas	Gasto aguas residuales (m ³ /año)	Sedimentos secos (t/año)	Sedimentos húmedos ¹ (m ³ /año)
Canal de Malda	1 728 262	346	745
Zona Hotelera	95 813	19	41
Colonia Rovirosa	544 471	109	235
Total	2 368 546	474	1 021

¹ 53.6% de humedad (cuadro 10).

Cuadro 8. Entradas de agua, sedimentos y contaminantes al vaso Cencali.

Parámetro	Unidad	Agua residual ¹	Escorrentamientos pluviales	Aportación total
Agua	m ³ /año	2 368 546	4 577 855	6 946 400
Sedimentos	m ³ /año	1 021	4 158	5 178
Nitrógeno	t/año	95	10	105
Fósforo	t/año	24	2	26
DBO ₅	t/año	474	56	530

¹ 100% de aguas residuales.

Volúmenes en el vaso

De acuerdo con la batimetría realizada, se estimaron los volúmenes de sedimentos y de la capa de agua del vaso Cencali. En las ilustraciones 7 y 8 se observan las isóbatas para agua y sedimentos correspondientes a mayo del 2002.

En el cuadro 9 se resumen los volúmenes y las profundidades del vaso, y de las capas de agua y sedimentos. Se observa que el volumen de agua fue muy reducido e inferior al de los sedimentos, que ocuparon aproximadamente 60% del volumen del vaso. De acuerdo con una batimetría realizada por la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1999), en 1999 los sedimentos sólo ocupaban 33% del volumen del vaso Cencali.

Por la ubicación en la entrada a la laguna de Las Ilusiones, el vaso Cencali funciona como un vaso sedimentador que, bajo condiciones adecuadas, protege al resto del sistema lagunar. Bajo las condiciones prevalecientes en el 2002, los sedimentos que entraron al vaso se transportaban durante eventos de fuertes

Cuadro 9. Volúmenes y profundidades de agua y sedimentos en el vaso Cencali.

Parámetro	Volumen (m ³)	Profundidad Intervalo (m)	Profundidad Promedio (m)
Vaso	52 890	3.5 - 0.0	1.67
Agua	21 340	1.6 - 0.0	0.69
Sedimentos estimados para 2002	31 550	3.0 - 0.0	0.98
Sedimentos estimados para 1999	17 287	2.5 - 0.0	0.56

avenidas, contaminando la laguna de Las Ilusiones con estos sólidos. Por lo tanto, para proteger la reserva ecológica de la laguna de Las Ilusiones era necesario diseñar un sistema de saneamiento para el vaso Cencali y desarrollar un programa de mantenimiento continuo para reestablecer el funcionamiento natural del vaso, a fin de evitar problemas de contaminación.

Ilustración 7. Profundidad del agua en mayo de 2002.

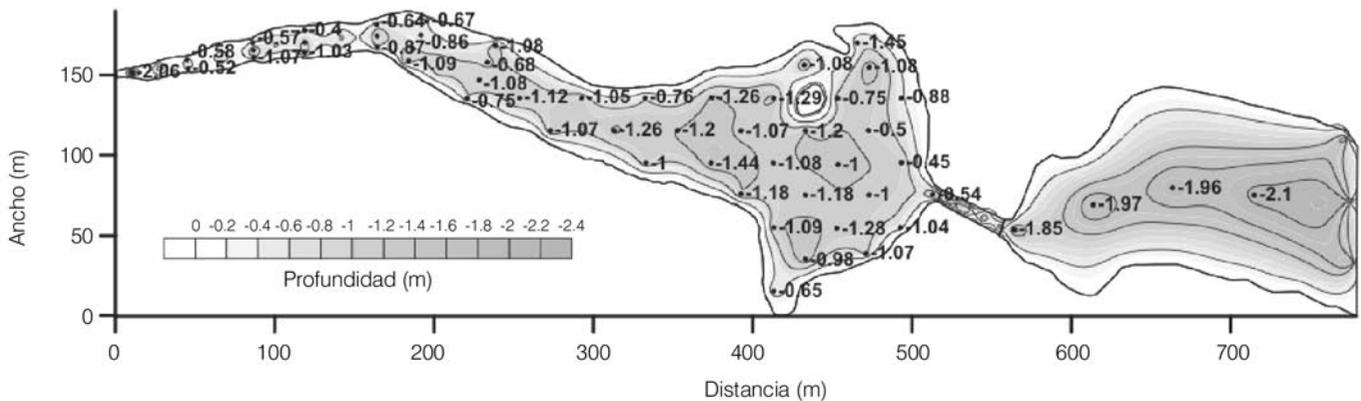
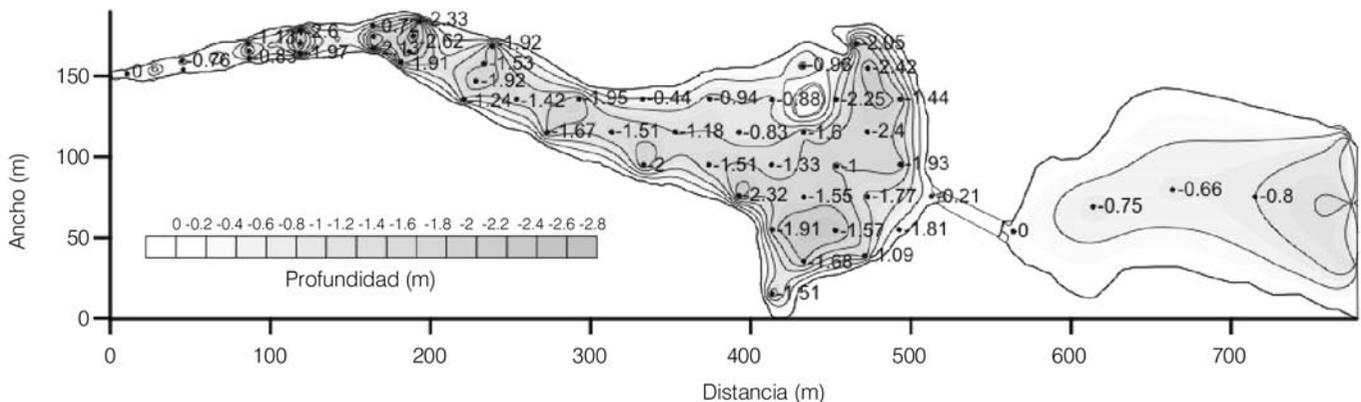


Ilustración 8. Profundidad de los sedimentos no consolidados en mayo de 2002.



Evaluación de la contaminación de los sedimentos

A través del análisis de 15 muestras de sedimentos y un total del 742 análisis químicos y microbiológicos, se evaluó

el cumplimiento de la calidad de los sedimentos del vaso Cencali con criterios ecológicos y para reúso de estos sólidos de México, Estados Unidos de América y Canadá (cuadro 2). Los resultados se resumen en el cuadro 10.

Cuadro 10. Caracterización de los sedimentos del vaso Cencali.

Parámetro	Unidades	Promedio	Desv. est. (%)	Número de muestras
Coliformes fecales		60 839	214	15
Salmonella	NMP/10 g	0	-	7
Huevos de helmintos				
Huevos de helmintos viables		41.1	116	7
Áscaris sp		13.7	55	7
Hymenolepis nana	Org/10 g	2.3	49	7
Trichuris sp		25.7	162	7
Toxocara sp		1.7	35	7
Plaguicidas organoclorados				
4,4' - DDD		8.98	110	10
Clordano		<0.020*	-	10
Dieldrín		<0.090*	-	10
Endosulfán I		<0.090*	-	10
Endosulfán II		<0.010*	-	10
Endosulfán sulfato		<0.010*	-	10
Endrín		<0.012*	-	10
Endrín aldehído		<0.013*	-	10
Heptacloro		<0.012*	-	10
Heptacloro epóxido	µg/kg	<0.014*	-	10
4,4' - DDE		30.79	70	10
Metoxicloro		<0.010*	-	10
Toxafeno		<0.240*	-	10
Hexaclorobenceno		<0.090*	-	10
4,4' - DDT		0.88	164	10
Aldrín		<0.009*	-	10
BHC a		<0.008*	-	10
BHC b		<0.011*	-	10
BHC d		<0.009*	-	10
BHC g (lindano)		<0.009*	-	10
Humedad	%	53.6	23	15
Materia orgánica		9.21	50	15
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/kg	1 246.88	37	15
Fósforo total		482.04	47	15
Bifenilos policlorados (PCBs)				
Aroclor 1016		<15*	-	10
Aroclor 1221		<15*	-	10
Aroclor 1232		<15*	-	10
Aroclor 1242		<15*	-	10
Aroclor 1248	µg/kg	<15*	-	10
Aroclor 1254		<15*	-	10
Aroclor 1260		<20*	-	10
Aroclor 1262		<20*	-	10
Aroclor 1268		<20*	-	10

Cuadro 10. Caracterización de los sedimentos del vaso Cencali (continuación).

Parámetro	Unidades	Promedio	Desv. est. (%)	Número de muestras
Hidrocarburos poliaromáticos				
Acenafteno		<0.7*	-	1
Acenaftileno		<0.7*	-	10
Antraceno		<0.9*	-	10
Benz(a)antraceno		<1.3*	-	10
Benzo(a)pireno		<0.7*	-	10
Benzo(b)fluoranteno		<0.6*	-	10
Benzo(g,h,i)perileno		<0.5*	-	10
Benzo(k)fluoranteno	µg/kg	<2.3*	-	10
Criseno		<0.8*	-	10
Dibenz(a,h)antraceno		<1.2*	-	10
Fenantreno		163	122	10
Fluoranteno		28	291	10
Fluoreno		1 167	66	10
Indeno(1,2,3-cd)pireno		<0.9*	-	10
Naftaleno		<0.8*	-	10
Pireno		75	116	10
Metales				
As		0.00002	97	15
Ba		219.88	44	15
Cd		0.26	243	15
Cr		102.00	25	15
Cu		60.78	70	15
Hg	mg/kg	0.29	47	15
Ni		39.39	27	15
Pb		96.57	77	15
Tl		1.41	387	15
V		113.59	31	15
Zn		398.51	76	15

* Límite de detección del método.

Promedios que rebasan el límite ISQG (cuadro 2).

Promedios que rebasan el límite PEL (cuadro 2).

Riesgos ecológicos relacionados con los sedimentos

Para la evaluación de los riesgos ecológicos relacionados con los sedimentos se usaron los criterios de Canadá y de Estados Unidos de América, que establecen niveles de riesgos relacionados con la contaminación de sedimentos (Ingersoll *et al.* 2000; CCME, 2002). Hansen *et al.* (2002) realizaron una evaluación detallada de la contaminación de los sedimentos basándose en los criterios antes presentados. Esta evaluación fue actualizada en el presente trabajo, considerando la publicación más reciente de criterios ecológicos (CCME, 2002). Para ello se compararon los criterios para cada parámetro con las concentraciones promedias obtenidas en todas las estaciones muestreadas. Como los promedios de varios parámetros sobrepasan el criterio de PEL (sombreado oscuro, cuadro 10), se puede clasificar el ecosistema como afectado en más de 65% de la vida acuática; es

decir, muy dañado. En el cuadro 11 se resume esta evaluación.

Alternativas de reúso

No existen normas mexicanas para el reúso de sedimentos. Por este motivo, para la estimación de riesgos ecológicos relacionados con el reúso de los sedimentos del vaso Cencali se aplicaron los criterios de Canadá y México para suelos y lodos, que establecen diferentes niveles de riesgo de la contaminación.

Según los criterios establecidos en la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (2003) para reúso de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, los sedimentos del vaso Cencali se pueden clasificar en la categoría "bueno". El promedio de la concentración de coliformes fecales excede el límite de la clasificación "excelente". Según esta clasificación,

Cuadro 11. Evaluación de la calidad de los sedimentos.

Grupo de contaminantes	Parámetros individuales	Promedio arriba de los límites	
		ISQG	PEL
PCB's totales	1	0	0
Hidrocarburos poliaromáticos	14	1	0
Plaguicidas organoclorados	5	2	2
Metales	7	5	3
Total	27	8	5

Cuadro 12. Evaluación del reúso de los sedimentos del vaso Cencali de acuerdo con la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

Grupo de contaminantes	Parámetros individuales	Promedio arriba de los límites	
		Excelente (Uso residencial)	Bueno (Agricultura)
Coliformes fecales	1	1	0
Salmonella sp	1	0	0
Huevos de helminto	1	0	0
Metales	10	0	0
Total	13	1	0

los sedimentos del vaso Cencali se pueden aplicar en terrenos con fines agrícolas, restauración de suelos y de paisajes (cuadro 12).

Como limitación establecida por la EPA (1984), los sedimentos deben aplicarse como abono en capas no mayores a 155 toneladas por hectárea una vez al año, en campos agrícolas de cosechas con tallo alto, como son los árboles frutales, maíz, algodón, soya y grano.

La norma mexicana para saneamiento y reúso de suelos contaminados se refiere a suelos contaminados con hidrocarburos y no considera límites para plaguicidas

y metales. Por lo tanto, de acuerdo con esta normatividad, los sedimentos del vaso Cencali no tienen restricciones para su reúso.

No obstante, la guía canadiense para reúso de suelos incluye más parámetros (CCME, 1999). Aplicando estos criterios (cuadro 10), los sedimentos del vaso sobrepasan en cuatro parámetros los límites para áreas agrícolas; en dos, los límites para áreas residenciales y parques, y con la concentración promedio de cromo, el límite para zonas comerciales e industriales (cuadro 13).

Cuadro 13. Evaluación del reúso de los sedimentos del vaso Cencali de acuerdo con la guía canadiense de calidad de suelos (CCME, 1999).

Grupo de contaminantes	Parámetros individuales	Promedio arriba de los límites			
		Agrícola	Residencial y parques	Comercial	Industrial
PCB's totales	1	0	0	0	0
Hidrocarburos poliaromáticos	9	1	0	0	0
Plaguicidas organoclorados	1	0	0	0	0
Metales	10	3	2	1	1
Total	21	4	2	1	1

Conclusiones y recomendaciones

La acumulación de sedimentos en el fondo del vaso Cencali, que representa la entrada a la laguna de Las Ilusiones, es un proceso inevitable debido a la urbanización y erosión natural en la cuenca tributaria. Por lo tanto, para conservar la laguna se requiere de un manejo apropiado del vaso Cencali.

De acuerdo con la caracterización ecotoxicológica de los sedimentos del vaso Cencali, donde los promedios de varios parámetros sobrepasan el criterio PEL, se clasificó este ecosistema como afectado en más de 65% de la vida acuática; es decir, muy dañado. Esto hizo necesario el diseño e implementación de un sistema de saneamiento que se adaptara a las condiciones particulares tanto del vaso Cencali como de su entorno, al considerar factores de espacio, tiempo y presupuesto; asimismo, que garantizara una adecuada extracción de los sedimentos, e impulsara la recuperación pronta y efectiva de este cuerpo de agua. Este diseño se presentará en un segundo artículo (van Afferden *et al.*, 2007). Del mismo modo, era importante implementar un sistema de control de descargas de aguas residuales y escurrimientos pluviales al vaso Cencali para impedir su continuo deterioro.

De acuerdo con la normatividad mexicana para lodos y biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003), el reúso debe ser limitado al uso urbano, sin contacto público directo durante su aplicación, usos forestales, mejoramiento de suelos y usos agrícolas.

No obstante, la guía canadiense para reúso de suelos incluye más parámetros (CCME, 1999), de los cuales cuatro sobrepasan los límites recomendados para uso en áreas agrícolas; dos, los límites para áreas residenciales y parques, y uno, para zonas comerciales e industriales, respectivamente.

Considerando lo anterior, se recomendó que los sedimentos del vaso Cencali fueran utilizados como material de capas selladas o diarias en la construcción de rellenos sanitarios, permitiendo el reúso de estos sólidos, en lugar de la disposición como residuos.

Para reducir las entradas de nitrógeno, fósforo y materia orgánica al vaso Cencali, se debe renovar y ampliar la cobertura de la red de drenaje en las colonias que drenan al vaso, separando las aguas residuales de las pluviales. Asimismo, se recomienda someter las aguas residuales a tratamiento adecuado antes de descargarlos al río. Lo anterior permitiría disminuir los problemas de eutroficación del mismo sistema lagunar, así como del río y la zona costera que reciben las descargas.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a las siguientes personas: ingeniero Manuel D'Árgence; biólogos Andrés Pedrero Sánchez y José Antonio Germán Arellano (SEDESPA); maestro en ingeniería Luis Carlos González Márquez, e ingenieros Nicolas Chapelain y Orlando Quintero (IMTA).

Recibido: 18/07/2006

Aprobado: 01/02/2007

Referencias

- CCME. Canadian Soil Quality Guidelines. *Canadian Environmental Quality Guidelines*. No. 1299. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.
- CCME. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. *Canadian Environmental Quality Guidelines*. No 1299. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002.
- CNA. Batimetría del vaso Cencali. Citado en: *DELTA (2001) Restauración de la calidad de agua del vaso Cencali mediante la aplicación de un compuesto químico con seguridad ambiental*. Informe final. Villahermosa, México: Comisión Nacional del Agua/SEDESPA, 1999.
- CNA. *Datos de precipitación diaria en el centro de la ciudad de Villahermosa. Estaciones: clave 27054 y 27055. Periodo: de 1926 a 1997*. Villahermosa, México: Comisión Nacional del Agua, 2002.
- DOF. Criterios ecológicos de calidad del Agua. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 13 de diciembre de 1989.
- EPA. *Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge*. U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati: EPA 625/10-84-003, 1984.
- EPA. *Innovative Urban Wet-Weather Flow Management Systems*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency EPA/600/R-99/029, 1999.
- EPA. *Nutrient Criteria Technical Guidance Manual: Lakes and Reservoirs*. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, EPA-822-B00-001, 2000.
- EPA. *Methods for Collection, Storage and Manipulation of Sediments for Chemical and Toxicological Analysis: Technical Manual*. EPA-823-B-01-002. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 2001.
- FAO. *Wastewater Characteristics and Effluent Quality Parameters*. Food and Agriculture Organization [en línea], <http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e03.htm>, 2002.
- HANSEN, A.M., VAN AFFERDEN, M., QUINTERO, O. y GONZÁLEZ, L.C. *Evaluación de la contaminación de los sedimentos en el vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco y alternativas de solución*. Informe final del proyecto TH-0216, Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002.

- INEGI. *Censo de 1995*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [en línea], <http://www.inegi.gob.mx>, 2002a.
- INEGI. *XII Censo General de Población y Vivienda. Tabasco*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática/ Sistema para la Consulta de Información Censal, 2002b.
- INGERSOLL, C.G., MACDONALD, D.D., WANG, N., CRANE, J.L., FIELD, L.J., HAVERLAND, P.S., KEMBLE, N.E., LINDSKOOG, R. A., SEVERN, C. y SMORONG, D.E. *Prediction of Sediment Toxicity using Consensus-based Freshwater Quality Guidelines*. EPA 905/R-00/007. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency, 2000.
- MUNICIPALIDAD CONCEPCIÓN. *Gestión municipal-Mega proyectos: recuperación de lagunas* [en línea], http://www.concepcion.cl/gestion/mega_proyectos.html, 2004.
- NIXDORF, B., HEMM, M., HOFFMANN, A. y RICHTER, P. *Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands*. Umweltbundesamtes: Abschlussbericht F&E Vorhaben, FKZ 299 24 274, 2003, pp. 1056.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. *Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F., 15 de agosto de 2003, pp. 18-60.
- SAHOP. *Normas de Proyectos para Obras de Alcantarillado Sanitario en Localidades Urbanas de la República Mexicana*. México, D.F.: Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, 1979.
- SALAS, H. y MARTINO, P. *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. Segunda edición. Lima: Programa Regional CEPIS/HEP/OPS 1981-1990, CEPIS, 1996.
- SAPAET. *Información sobre lavaderos y vasos reguladores existentes en la ciudad de Villahermosa, Tabasco*. Comunicación personal. Servicios de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Tabasco, 2002.
- SEDESPA. *Datos de calidad del agua obtenidos en monitoreo rutinario en 34 eventos de muestreo en el periodo comprendido entre 1995 y 2001*. Comunicación personal. Secretaría de Desarrollo Urbano y Protección Ambiental, 2002.
- SØNDERGAARD, M., JEPPESEN, E., JENSEN, J.P. y LAURIDSEN, T. *Lake restoration in Denmark. Lakes & Reservoirs: Research and Management*. Volume 5, Issue 3, September 2000, p. 151.
- VAN AFFERDEN, M., HANSEN, A.M. y TORRES-BEJARANO, F. *Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. II. Diseño del proceso. Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, núm. 1, 2008 (aceptado).

Abstract

HANSEN, A.M., VAN AFFERDEN, M. & TORRES-BEJARANO, F. *Remediation of the Cencali lagoon, Villahermosa, Tabasco. I. Pollution and sediment reuse. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXII, no. 4, October-December, 2007, pp. 87-102.*

As a result of urban runoff and wastewater discharges, important amounts of sediment have accumulated in the Cencali lagoon, located in the center of Villahermosa, Tabasco, Mexico. A bathymetry was performed in 50 points, and the accumulated volume of these solids was quantified in 31,550 m³. Sediment and pollutant yields from urban runoff and wastewater discharges were also estimated by analyzing soil use and population density in the watershed. The lagoon receives around 7,000,000 m³/yr of water, 5,200 m³/yr of sediments, 105 t/yr of nitrogen, 26 t/yr of phosphorous, and 530 t/yr of DBO₅. Sediment quality was assessed at 11 sampling stations by carrying out 742 individual chemical and microbiological analyses. According to the chemical and microbiological quality of the sediment and applying international ecological criteria of the aquatic life, the Cencali lagoon could be classified as more than 65% affected. Applying Mexican standards for the reuse of sludge, sediments from the Cencali lagoon can be applied on agricultural land and soil restoration. Another potential use could be as sealing layers in landfills.

Keywords: urban runoff, wastewater, sediment quality.

Dirección institucional de los autores:

Dra. Anne M. Hansen

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso,
62550 Jiutepec, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00, extensión 610,
ahansen@tlaloc.imta.mx

Dr. Manfred van Afferden

Centre for Decentralized Sewage Treatment,
An der Luppe 2, 04178 Leipzig, Germany,
teléfono: + (49) (0) 341 235 3639,
manfred.afferden@ufz.de

M. en I. Franklin Torres-Bejarano

Instituto Mexicano del Petróleo,
Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152,
colonia San Bartola Atepehuacan,
07730 México, D.F.,
teléfono: + (52) (55) 9175 6956,
fmtorres@imp.mx