

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. II. Diseño del proceso
<i>Autor / Adscripción</i>	Manfred van Afferden Anne M. Hansen Franklin Torres Bejarano Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 23(1): 57-70
<i>Fecha de publicación</i>	2008
<i>Resumen</i>	Este artículo es el segundo de dos partes que resumen las actividades y los estudios realizados durante la evaluación y el diseño del proceso de saneamiento del vaso Cencali en el centro de Villahermosa, Tabasco, México. Se identificó la remoción de sedimentos como medida más urgente para el rescate del vaso. Se diseñó y adaptó un proceso que consiste en los componentes de dragado por bombeo, sedimentación, transporte y secado de los sedimentos. Además se propuso un concepto para el futuro mantenimiento del vaso, consistente en la combinación de procesos de sedimentación y dragado en una depresión topográfica construida dentro del vaso para este propósito.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/851

Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco.

II. Diseño del proceso

Manfred van Afferden
Anne M. Hansen
Franklin Torres-Bejarano

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Este artículo es el segundo de dos partes que resumen las actividades y los estudios realizados durante la evaluación y el diseño del proceso de saneamiento del vaso Cencali en el centro de Villahermosa, Tabasco, México. El estado hipereutrófico de este cuerpo de agua está constituido principalmente por la acumulación de una gran cantidad de sedimentos provenientes de escurrimientos urbanos y aguas residuales. Por lo tanto, se identificó la remoción de estos sedimentos como medida más urgente para el rescate del vaso. La ubicación del vaso, el reducido espacio disponible en zonas adyacentes, así como las características propias de los sedimentos, impidieron un diseño tradicional del proceso. Por ello se diseñó y adaptó un proceso que consiste en los componentes de dragado por bombeo, sedimentación, transporte y secado de los sedimentos. De acuerdo con el análisis de humedad de sedimentos y experimentos pilotos de bombeo, la mezcla de agua-sedimento dragada tenía entre 65 y 85% de humedad, resultando en volúmenes a remover entre 50 400 m³ y 130 000 m³. Para controlar y reducir el volumen de sedimentos transportados, y evitar tiempos y costos excesivos, se diseñó una tecnología de sedimentación en cuatro tanques flotantes-sumergibles colocadas en el vaso Cencali. Además se propuso un concepto para el futuro mantenimiento del vaso, consistente en la combinación de procesos de sedimentación y dragado en una depresión topográfica construida dentro del vaso para este propósito.

Palabras clave: lagunas urbanas, dragado, sedimentación, transporte y disposición.

Introducción

La eutroficación de lagos y lagunas localizados dentro o cerca de zonas urbanas representa un problema en varios países (Knight, 2001; Søndergaard *et al.*, 2000; Nixdorf *et al.*, 2003; Municipalidad Concepción, 2004; FAUNAGUA, 2004) y casi siempre es resultado de un manejo inadecuado de la cuenca urbanizada y la falta de control de las entradas de escurrimientos urbanos y aguas residuales.

En 2003, la situación del vaso Cencali —localizada en el centro de la ciudad de Villahermosa, en el estado de Tabasco, México— estaba constituida por un

volumen de sedimentos acumulados mayor que el del agua, que se manifestaba esencialmente en olores desagradables, mortandad de peces por falta de oxígeno, y crecimiento incontrolado de tapetes flotantes de algas y bacterias.

Con una superficie de 3.1 ha y un volumen total de aproximadamente 53 000 m³, el vaso Cencali representa la entrada hidrológica principal de la reserva ecológica de la laguna de Las Ilusiones, con una extensión de 200 hectáreas.

Este trabajo presenta una descripción de los estudios realizados para el diseño del proceso de saneamiento del vaso Cencali.

Descripción de la problemática del vaso Cencali

El vaso Cencali se localiza en el centro turístico de la ciudad de Villahermosa, Tabasco, a la entrada del extenso sistema lagunar de la laguna de Las Ilusiones. La laguna representa un ecosistema clave, al ser hábitat de especies silvestres en peligro de extinción como el manatí (*Trichechus manatus*), servir de espacio para la recreación, educación e investigación, y fungir como vaso regulador de las aguas de lluvia de la ciudad. Hansen *et al.* (2007) presentan una descripción detallada del vaso Cencali y de su cuenca; por tal motivo, aquí se presentan sólo los datos con mayor relevancia para el diseño del saneamiento. Estos autores encontraron que el vaso Cencali 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, como aportaciones de los escurrimientos urbanos y aguas residuales.

La humedad promedio de sedimentos acumulados en el fondo del vaso era de 53.6% (Hansen *et al.*, 2007). Se estimó un volumen de 31 550 m³ de estos sedimentos para extraer del vaso. La consistencia de los sedimentos en grandes partes del vaso era arcillosa (85%) y la textura, como un gel. En muchas partes del vaso, el tirante de agua no alcanzaba 50 cm y la capa de sedimentos semilíquidos llegaba hasta 3.5 m.

Esto reafirma la necesidad de establecer un proceso de saneamiento y recuperación del vaso, debido a que existe el riesgo potencial de contaminación del sistema lagunar de la laguna de Las Ilusiones, en tanto que el vaso Cencali funciona como un vaso de sedimentación, reteniendo los sedimentos que recibe a través de aguas residuales y escurrimientos urbanos, y que de otra forma entrarían directamente a la laguna de Las Ilusiones (Hansen *et al.*, 2007). Como acción de emergencia, la remoción de los sedimentos era la medida más urgente para el rescate del vaso Cencali y la protección del sistema lagunar de Las Ilusiones.

El vaso Cencali está rodeado por zonas residenciales y hoteleras, con edificios y jardines que llegan hasta la orilla en la parte noroeste y una angosta calle de 4 m de ancho en la orilla de la parte sureste, lo cual representaba dos principales implicaciones para el saneamiento:

- Era una zona sensible y el saneamiento no debía provocar riesgos para la salud de la población, ni ruido, olor o grandes efectos negativos a la estética del entorno.
- El espacio para la obra era muy reducido.

Asimismo, era recomendable realizar el saneamiento durante la época de estiaje, reduciendo a un lapso de cuatro meses al año el periodo para la ejecución de las obras.

A continuación se describe el diseño detallado de cada una de las fases que integraron el proceso de saneamiento. Por su ubicación en una zona de uso habitacional y recreativo, el diseño detallado de los procesos del saneamiento debía producir un impacto social mínimo. Además, el presupuesto disponible para las obras estaba restringido.

Sistema de dragado

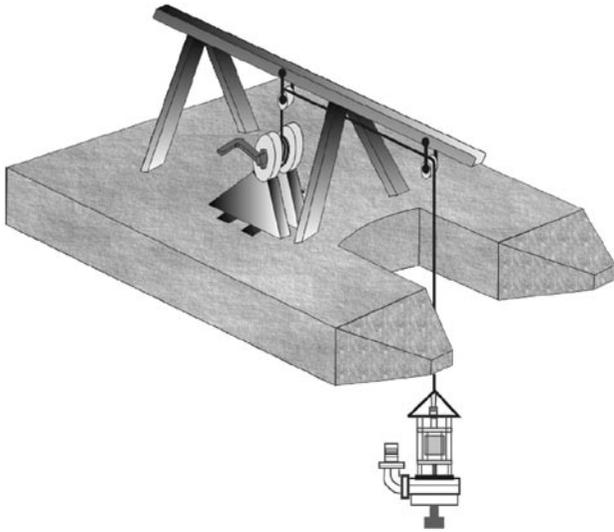
Después de un análisis detallado de la disponibilidad de espacios, duración de la temporada de estiaje, cantidades de sedimentos a remover (31 550 m³) (Hansen *et al.*, 2007), y composición y características de estos sólidos, se definió que la tecnología más adecuada para el saneamiento del vaso Cencali era la extracción mediante bombas sumergibles. Alternativas como el dragado convencional con o sin aislamiento, y secado del vaso no eran recomendables, principalmente por falta de espacio en la orilla. Además, se consideró tanto el impacto negativo que causarían estas tecnologías para la sociedad (salud, ruido, suciedad), como la poca profundidad del tirante de agua y la profundidad de la capa de sedimentos semilíquidos, que impedían usar dragas convencionales de excavación.

Para el proceso de dragado se recomendó una bomba sumergible de combustión interna. Para el bombeo de sedimentos arcillosos y limosos, como los sedimentos del vaso Cencali, se debía contar con un paso de esfera superior a tres pulgadas para tener la capacidad de remover objetos tales como pequeñas piedras, ramas o basura urbana. Asimismo, era preferible que la bomba contara con un sistema de giro reversible para destaparla en caso de obstrucción por tales objetos. También se debía garantizar un diferencial de presión que asegurara que la línea de descarga alcanzara los puntos más distantes de bombeo.

La bomba debía ser acoplada a una plataforma flotante (pontón), que poseía un mecanismo para su sostenimiento y desplazamiento vertical (ilustración 1). Contó, además, con un mecanismo para el desplazamiento horizontal de la plataforma en el vaso, que se realizó a través de cables fijados en la orilla y malacates instalados en la plataforma flotante.

Se evaluó el rendimiento del proceso mediante un experimento piloto de dragado. Para ello se bombearon sedimentos del vaso Cencali con una bomba sumergible que cumpliera con las especificaciones del proceso.

Ilustración 1. Equipo de bombeo para dragado de sedimentos (adaptado de Piranha Pumps, 2002).



Se demostró que un desplazamiento nulo o interrumpido resulta en un bombeo de mayores cantidades de agua y menores contenidos de sedimentos.

En la ilustración 2 se aprecian dos muestras tomadas en diferentes condiciones: en la imagen (a) aparece una muestra con bajo contenido de sedimentos (aproximadamente 20% de sedimento fresco), tomada durante un bombeo realizado sin desplazamiento de la bomba; en la imagen (b) aparece una muestra con alto contenido de sedimentos (aproximadamente 90% de sedimento fresco), obtenida durante el bombeo con desplazamiento continuo de la plataforma.

El contenido de sedimentos se midió por medio de un densímetro para suelos ASTM 151H, previamente calibrado a través de la medición de suspensiones de sedimentos del vaso Cencali con diferentes concentraciones conocidas. El 100% de sedimentos se refiere a los sedimentos acumulados en el fondo del vaso, con una humedad promedio de 53.6% (Hansen *et al.*, 2007). Por lo tanto, un rendimiento de 90% de sedimentos significa que se bombeó 10% de agua adicional, resultando en una suspensión con 44.1% de sólidos en base seca y un contenido de agua de 55.9%.

Se recomendó que el dragado se efectuara controlando que la draga succionara estando sumergida en los sedimentos. Con el fin de obtener una mezcla con el mayor contenido de sólidos posible, la plataforma se debía desplazar continuamente durante el bombeo, ya que esto repercute significativamente en la cantidad de sedimentos de la mezcla bombeada.

Con base en estos resultados, y para estimar el volumen total de la mezcla agua/sedimentos a bombear, se verificó el volumen resultante de diferentes mezclas agua-sedimento. Para tener mayor control de la obra, se analizó el volumen de sedimentos con diferentes contenidos de agua. Para ello, a una muestra de sedimento seco, compuesta de diferentes zonas del vaso Cencali, se agregaron diferentes cantidades de agua, determinando cada vez el volumen resultante. A partir de los resultados obtenidos se graficó el volumen de la mezcla contra contenido de agua (ilustración 3), refiriéndose al volumen de 31 550 m³ de sedimentos a extraer del vaso (Hansen *et al.*, 2007).

Ilustración 2. Medición con densímetro de muestras de sedimentos extraídos: (a) sin desplazamiento horizontal de la bomba y □ resultando en elevado contenido de sedimentos.

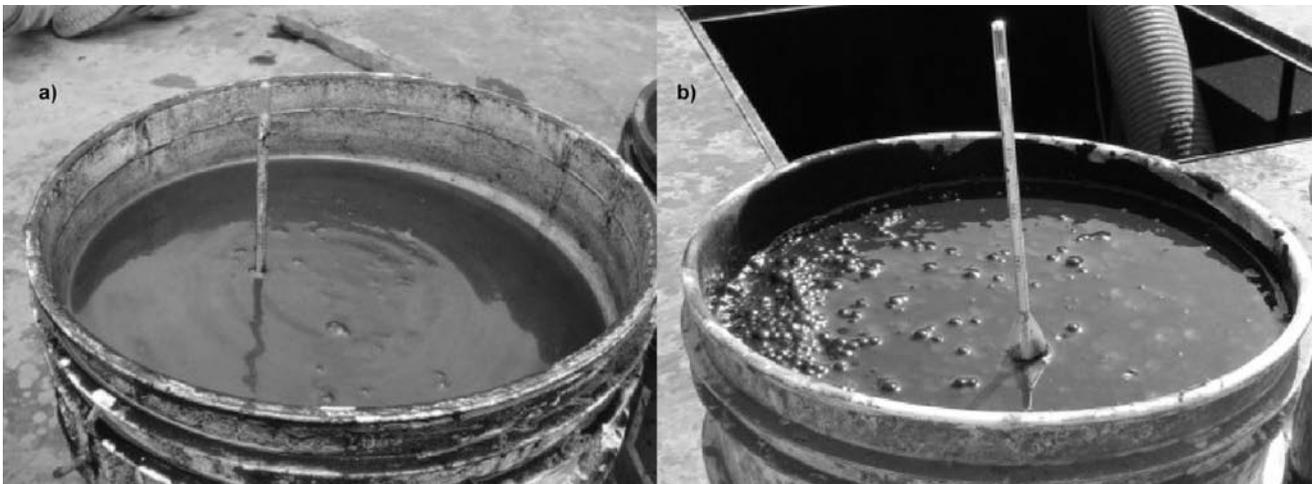
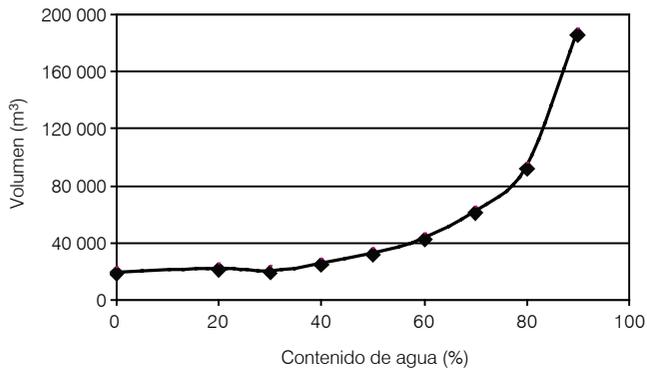


Ilustración 3. Volumen de sedimentos a extraer con diferentes contenidos de agua.



Se observa que a partir de 70% de contenido de agua, el volumen de los sedimentos se incrementa drásticamente, implicando que un dragado con rendimientos menores a 30% de sedimentos (equivalente a más de 70% de humedad) aumenta exponencialmente los volúmenes a transportar, repercutiendo en los costos.

Lo anterior demuestra la importancia de medir el contenido de agua durante la operación del dragado. La forma más conveniente es mediante el densímetro calibrado en la descarga de la bomba. Cuando el contenido de agua exceda 70%, la suspensión de sedimentos debe someterse a un proceso de sedimentación para reducir el contenido de agua mediante decantación

(ilustración 3). Sedimentos con contenidos de agua menores a 70% podrán ser bombeados directamente a las pipas para su transporte a un lecho de secado.

Se planeó que el dragado se iniciaría desde la parte angosta del vaso, avanzando hacia la parte más ancha. Se recomendó que el avance fuera en este sentido, porque evita que en casos de lluvia los sedimentos entren nuevamente hasta las zonas ya dragadas (ilustración 4).

Sedimentación

El dragado de sedimentos por bombeo siempre implica la extracción de una cantidad adicional de agua, dependiendo de la tecnología, el tipo de sedimentos y el modo de operación durante el proceso. El bombeo con altos contenidos de agua se pueden traducir en un aumento considerable de los costos de transporte. Por tal motivo, los procesos de dragado a menudo incluyen una componente para la separación de agua, ya sea por gravedad en lechos de sedimentación o por maquinarias tales como centrífugas o prensas de banda. El análisis detallado de las condiciones en la zona adyacente del vaso Cencali reveló que no era posible instalar un lecho de sedimentación lo suficientemente grande. Asimismo, la instalación de maquinaria no era factible por razones económicas, al igual que para evitar ruido y suciedad. Por tal motivo, y para obtener un mejor control de la obra y reducir los costos de transporte, se propuso

Ilustración 4. Secuencia de la operación de dragado.



aprovechar el área interior del vaso Cencali para realizar la sedimentación mediante tanques flotantes-sumergibles colocados dentro del mismo vaso (ilustración 5).

Este sistema consistió en tanques flotantes-sumergibles, que se hunden hacia el fondo del vaso cuando se llenan con la suspensión sedimento/agua y que emergen durante el vaciado. Esta construcción tiene como ventaja que no ocupa espacio en la orilla y que, en comparación con una construcción sobre tierra firme, tiene costos relativamente bajos del material para su construcción. La ilustración 5 muestra el funcionamiento de los sedimentadores.

Para obtener los parámetros de diseño de los tanques sedimentadores, en experimentos de laboratorio se estimaron las velocidades de sedimentación de diferentes mezclas agua-sedimento en una columna de acrílico de 2.8 m de altura con puertos de muestreo (ilustración 6).

La columna se llenó hasta 2.5 m de altura, con suspensiones de 50, 35 y 10% de sedimento. Considerando el contenido de 53.6% de agua en los sedimentos frescos del vaso Cencali, estos porcentajes equivalen a rendimientos de bombeo de 93, 65 y 19%, respectivamente. Desde el inicio de la prueba se tomaron muestras de 30 ml en los puertos del uno al cuatro, a

Ilustración 6. Columna de sedimentación con puertos de muestreo.

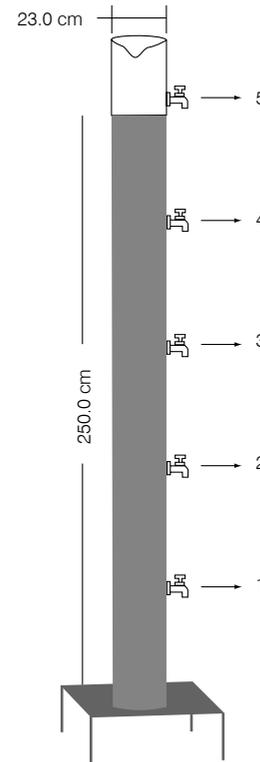
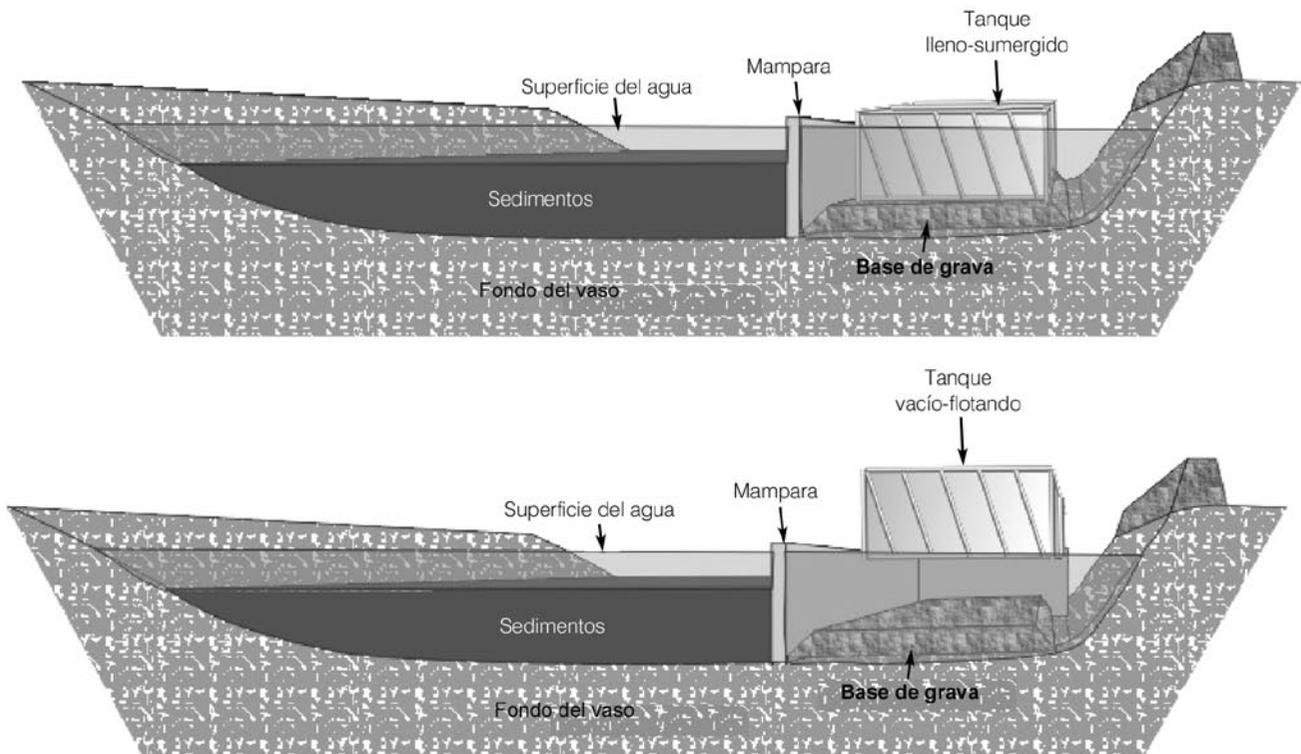


Ilustración 5. Esquema de funcionamiento de los tanques sedimentadores.



intervalos de tiempo específicos, midiéndose cada vez la variación de la altura de sedimentos. Los resultados se presentan en la ilustración 7.

En el cuadro 1 se presentan los volúmenes que se manejarían para diferentes rendimientos de bombeo de sedimentos frescos (bombeo equivalente). Considerando cuatro sedimentadores de 10 x 10 x 3 m y 12 horas de sedimentación, se presenta la duración estimada de la obra.

El volumen a transportar se estima a partir de los resultados experimentales de sedimentación (ilustración 7), el porcentaje de sedimentos después de 12 h de sedimentación y el bombeo equivalente:

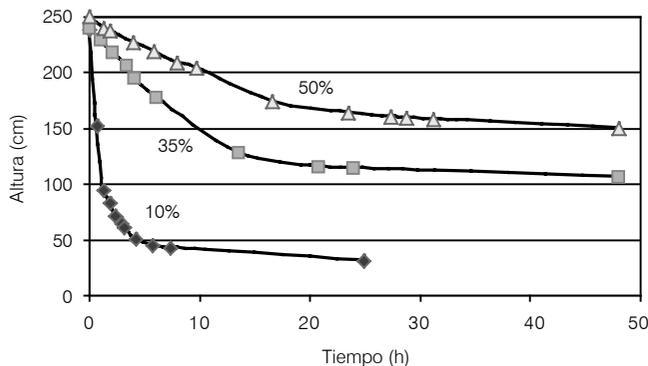
$$V_{tr} = \%Sed \times Be$$

donde:

- V_{tr} = volumen total a transportar (m^3).
- $\%Sed$ = porcentaje de sedimentos después de 12 h de sedimentación (%).
- Be = bombeo equivalente (m^3).

El volumen de sedimentos por día se obtiene de la multiplicación del área de los tanques por la altura de sólidos sedimentados y el número de tanques llenados:

Ilustración 7. Curvas de sedimentación para diferentes concentraciones de sedimento.



Cuadro 1. Estimación de volúmenes y tiempos a manejar en el saneamiento del vaso Cencali.

Rendimiento de bombeo (%)	Contenido de agua (%)	Volumen a bombear (m^3)	Volumen a transportar (m^3)	Volumen por día (m^3)	Duración de la obra (mes)
19	90	400 000	64 000	160	13.2
65	65	114 286	64 762	608	3.77
93	50	80 000	62 720	784	2.64

$$V_d = Ar \times hs \times Nt$$

donde:

- V_d = volumen a transportar por día (m^3).
- Ar = área del tanque (m^2).
- hs = altura de sedimentos sedimentados (m).
- Nt = número de tanques llenados.

La duración de la obra se obtiene dividiendo el volumen total a transportar (el mismo calculado anteriormente) por el volumen de sedimentos transportados al día y por el número de días laborables al mes:

$$DO = V_{tr} / (V_d \times Nd)$$

donde:

- DO = duración de la obra (meses).
- V_{tr} = volumen total a transportar (m^3).
- V_d = volumen a transportar por día (m^3).
- Nd = número de días laborables al mes.

Considerando el tiempo disponible de cuatro meses en época de estiaje y la operación con cuatro tanques sedimentadores, se recomendó un rendimiento mínimo del bombeo de 36% (cuadro 2).

El cuadro 2 también resume las demás características con que debió cumplir un sistema adecuado para el bombeo de sedimentos del vaso Cencali.

Tanques sedimentadores

Se diseñaron cuatro tanques sedimentadores de acero, flotante-sumergibles, de 10 m de ancho por 10 m de largo y 3 m de altura, con capacidad para almacenar hasta 250 m^3 de agua y sedimentos. Del diseño estructural se definió que los tanques se construyeran y reforzaran con armaduras de perfiles PTR de 2" x 2" x 2.8 mm de espesor de 10 m de largo por 3 m de ancho, a cada 2.5 m de separación y en ambas direcciones (ilustración 8).

Cuadro 2. Requisitos del sistema del bombeo para la excavación de sedimentos en el vaso Cencali.

Requisitos del proceso de dragado	Unidad	Cantidad/especificaciones
Volúmenes		
Volumen de sedimentos a remover del vaso	m ³	31 550
Rendimiento mínimo promedio del bombeo	%	36
Volumen promedio de bombeo por día	m ³ /día	1 000
Distancias		
Profundidad máxima de dragado	m	4.5
Distancia máxima de bombeo	m	450
Elevación máxima de bombeo	m	8
Bomba		
Tipo de bomba recomendada	n.a.	Bomba sumergible con sistema hidráulico de vacío
Tipo de cabezal		Debe contar con un sistema para disgregar los sedimentos
Número de bombas	pza.	2
Capacidad mínima de la bomba (gasto promedio/ tiempo efectivo de bombeo de seis horas al día)	m ³ /min	5
Diferencial de presión mínimo	PSI	1 500
Mínimo paso de esfera	pulgadas	2
Descarga mínima	pulgadas	6
Sistema de desplazamiento	n.a.	Se debe contar con un mecanismo para el sostenimiento y desplazamiento vertical Manual o automática
Operación		
Tubería		
Tipo de tubería recomendada	n.a.	Flotante flexible
Diámetro de tubería	pulgadas	6
Longitud mínima de tubería	m	450
Plataforma (pontón)		
Sistema de desplazamiento	n.a.	Se debe contar con un mecanismo para el sostenimiento y desplazamiento horizontal
Capacidad recomendada	t	10
Profundidad máxima	m	0.5
Dimensiones	n.a.	Transportable en zonas urbanas

n.a. = no aplica.

Para facilitar el vaciado completo de los sedimentos de los tanques, se diseñó el fondo con pendiente de 2% hacia el centro y cámara de recolección en el centro de cada tanque. Además, para el bombeo del agua sobrenadante se diseñaron cárcamos que funcionaran con dos compuertas deslizantes con desplazamiento vertical, cubierto con lámina de acero, calibre 20 (0.93 mm).

Los tanques debían estar ubicados dentro del vaso Cencali, en una zona protegida por una cerca de pilotes, con tubería de acero de ocho pulgadas de diámetro, hincados a cada 3 m y muro de concreto armado de 1.50 m de altura, formado con mamparas de 3 x 0.50 m,

delimitando una superficie de 54 m de largo por 18 m de ancho, en la orilla del vaso.

La zona de protección debía acondicionarse excavando el fondo de la laguna, colocando una base de grava para el asentamiento uniforme de los tanques, a una profundidad de 2.5 m. Para evitar el movimiento incontrolado de los tanques, éstos debían sujetarse con cables de acero a los pilotes de la cerca de protección en el lado interior de la laguna, y del lado de la orilla, a atraques de concreto construidos para tal propósito (ilustración 9).

Los tanques de sedimentación se llenaban uno a la vez, dejando un bordo libre alrededor de 50 cm. La

Ilustración 8. Vista interior de los tanques con refuerzos.



Ilustración 9. Tanques flotantes-sumergibles en la orilla del vaso.



operación de llenado en el vaso Cencali se programó para realizarse en aproximadamente 1.5 horas por tanque, con un bombeo de $3.0 \text{ m}^3/\text{min}$. Al finalizar el llenado de un tanque, la manguera de descarga se trasladaba a otro tanque para iniciar su llenado.

A la mañana siguiente se instalaba la manguera de la bomba de agua hacia al fondo del cárcamo del primer tanque sedimentador.

Se ajustaban las compuertas del cárcamo a los niveles de sedimentos acumulados en el tanque y daba inicio el bombeo del agua sobrenadante hacia al vaso Cencali, fuera de la zona de colocación de tanques. Siguiendo el mismo procedimiento, se vaciaban los demás tanques.

Para el control diario del volumen de sedimentos extraídos y la eficiencia en la operación de la draga, se

medían en los cinco puntos disponibles de los tanques (cada esquina y el centro) la altura de sedimentos acumulados y la altura total de sedimento más agua.

Transporte

Al no haber espacio en la cercanía del vaso Cencali para el reúso o depósito de los sedimentos extraídos, era necesario transportarlos a un lugar adecuado en las afueras de la ciudad de Villahermosa.

No era factible el transporte por embarcación atravesando por la laguna de Las Ilusiones debido a la existencia de puentes que cruzan de lado a lado este cuerpo de agua. Por ello, para el transporte era recomendable usar pipas o vehículos contenedores cerrados, a fin de evitar derrames en la vialidad durante el llenado y transporte (ilustración 10).

La distancia desde el vaso Cencali hasta el terreno donde fue ubicado el lecho de secado era de aproximadamente 6.5 km. Para fines de seguridad y control, se recomendaba que las pipas circularan a velocidad promedio de 20 km/h, resultando en una duración del recorrido de los 13 km de ida y vuelta en aproximadamente cuarenta minutos.

Secado de los sedimentos

Se recomendó que los sedimentos podían ser usados en la construcción o como capas diarias en la operación de rellenos sanitarios posterior a su secado (Hansen *et al.*, 2007). La forma más adecuada de secar los sedimentos era por deshidratación solar en lechos de secado. Para ello se contó con un terreno de 20 ha ubicado en las afueras de la ciudad de Villahermosa.

Ilustración 10. Pipa para transporte de sedimentos.



En el diseño del lecho de secado se contempló la construcción de seis celdas de 100 m de largo por 50 m de ancho (0.5 ha cada una) colocadas 3 x 2 en el sentido longitudinal del terreno (ilustración 11). Se consideró un camino de acceso de entrada y salida, así como un camino de operación de las pipas alrededor de cada celda.

En el diseño se tomó en cuenta la construcción de bordos de las celdas del lecho con terraplenes de 1.50 m de alto, 1.50 m de corona y 6.0 m de base, con taludes de 1.5:1 en proporción vertical. Para la construcción del lecho fue levantada una plataforma horizontal en la elevación de 4.5 m, un metro arriba del nivel de agua mínimo de la laguna que rodea el terreno, creando zonas de excavación y relleno.

Para evitar la saturación de los terraplenes, se recomendó impermeabilizarlos con una capa de arcilla de 20 cm de espesor en el lado interior de los taludes. Se diseñaron aperturas para la instalación de compuertas deslizantes, a fin de desalojar el agua pluvial en caso de almacenarse en exceso.

El volumen efectivo del lecho de secado fue de 36 000 m³. Debido a que el volumen total a transportar era de máximo 80 000 m³ (64 000 m³ multiplicado por un factor de seguridad de 1.25), se requería de una reducción de volumen por evaporación durante el tiempo que durara el saneamiento. Para lograr esto, las capas de sedimentos debían ser delgadas y distribuidas en forma homogénea en cada celda. Por lo anterior, era recomendable que las celdas del lecho de secado fueran llenadas consecutivamente, descargando en una celda por día. Para ello se debían utilizar mangueras de mínimo 50 m de largo, que permitieran descargar los sedimentos en el centro de las celdas, cambiando de celda diariamente, para regresar a la misma después de seis días, lo cual

permitiría que en ese lapso se secaran parcialmente los sedimentos.

Control del avance de dragado

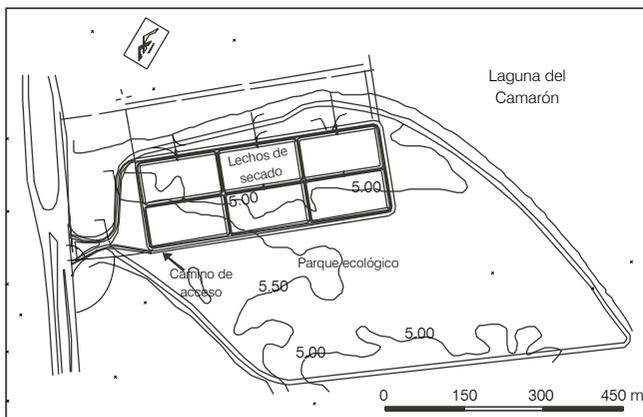
Para conocer el avance en la extracción de sedimentos durante la ejecución de las obras de saneamiento, se realizaron batimetrías semanales, con las cuales se obtuvieron los volúmenes de sedimentos extraídos. Para tal efecto, se dispuso de un estadal de 4 m de largo, graduado cada 5 cm y equipado con un disco de plástico (diámetro 30 cm) acoplado a su base, como se muestra en la ilustración 12.

La metodología recomendada para la realización de las batimetrías consistía en medir desde una plataforma flotante la profundidad del agua hasta el sedimento firme en cincuenta puntos distribuidos en el vaso Cencali. El disco en la base del estadal permitía la detención de su desplazamiento al llegar a la superficie de los sedimentos e impedía que se introdujera en éstos, lo que evitaba mediciones erróneas. Con los datos batimétricos fijados a un nivel de referencia se puede calcular el volumen de

Ilustración 12. Estadal utilizado para las batimetrías.



Ilustración 11. Plano del lecho de secado.



La sedimentación se calculó con base en los picos de los gastos que entrarían al sedimentador. Para calcular los gastos máximos que aporta el Canal de Malda, se analizaron las precipitaciones históricas para las dos estaciones hidrológicas localizadas en el centro de Villahermosa durante el periodo de 1926 a 1997. De los 32 416 datos existentes (CNA, 2002), se extrajo el promedio anual del número de eventos de lluvia con precipitaciones de más de 80, 40 y 20 mm (cuadro 3).

Se observa que 18% de las lluvias corresponden a eventos con más de 80 mm por día. Suponiendo que esta cantidad de lluvia precipita en seis horas, resulta en un gasto máximo de 22 079 m³/h por el Canal de Malda. Para una lluvia de 40 mm en seis horas, resulta en un gasto máximo de 11 040 m³/h, y para eventos de 20 mm de precipitación, en 5 520 m³/h (cuadro 4).

Las dimensiones del sedimentador primario fueron calculadas con los datos y las ecuaciones de diseño

Cuadro 3. Ocurrencia de lluvias de acuerdo con la magnitud.

Descripción	Precipitación		
	> 80 mm	> 40 mm	> 20 mm
Eventos de precipitación (día/año)	3.23	14.25	35.11
Proporción de la precipitación anual (%)	18.2%	45.7%	72.3%

Cuadro 4. Consideraciones de diseño del sedimentador.

Consideraciones de diseño	Parámetros/ecuaciones	Cálculo para precipitaciones		
		< 80 mm	< 40 mm	< 20 mm
Velocidad a través del sedimentador (m/h)	Vel	36	36	36
Tiempo de retención hidráulico (h)	TR	3	3	3
Altura o profundidad del sedimentador (m)	H	3	3	3
Velocidad de sedimentación (m ³ /m ² h)	M = H/TR	1	1	1
Área de la cuenca (m ²)	Ac	2 207 946	2 207 946	2 207 946
Precipitación (m)	P	0.08	0.04	0.02
Duración de la lluvia (h)	T	6	6	6
Escurrimiento (%)	Esc	76	76	76
Gasto máximo (m ³ /h)	Qm = Ac*(P/T)*Esc	22 079	11 040	5 520
Longitud del sedimentador (m)	L = Vel*TR	108	108	108
Ancho del sedimentador (m)	B = Q/(Vel*H)	204	102	51
Volumen del sedimentador (m ³)	Vol = L*B*H	66 238	33 119	16 560
Área del sedimentador (m ²)		22 079	11 040	5 520
Sedimentos retenidos ¹ (%)		70	61	46

¹ % del total de sedimentos que entra anualmente al vaso Cencali.

que se presentan en el cuadro 4. Para retener hasta 70% de los sedimentos que entran al vaso Cencali por el Canal de Malda, el sedimentador debe tener un área de aproximadamente 2.2 ha y una profundidad de 3 m, es decir, demasiado grande para construirlo dentro de esta zona urbana.

Además, de acuerdo con Hansen *et al.* (2007), entran cantidades considerables de sedimentos (1 100 m³) provenientes de la colonia Rovirosa y la zona hotelera, haciendo que un sedimentador en la entrada del Canal de Malda no sea suficiente como única medida para proteger la reserva ecológica de la laguna de Las Ilusiones. Por lo anterior, se recomienda que el vaso Cencali continúe funcionando como sedimentador de tales escurrimientos urbanos. Para ello es necesario llevar a cabo mantenimientos periódicos del vaso, extrayendo anualmente los nuevos sedimentos acumulados.

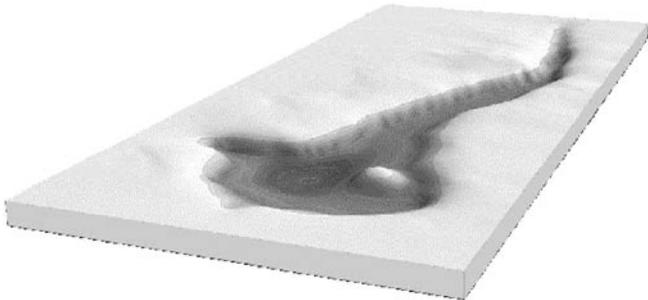
Para la extracción de los sedimentos acumulados anualmente, se recomienda que el mismo vaso Cencali continúe funcionando como sedimentador de los escurrimientos que entran a través de las tres subcuencas (Canal de Malda, zona hotelera y Colonia Rovirosa). Considerando que el área del vaso es de 3.1 ha, con una profundidad promedio de 1.7 m (después del dragado) y volumen de aproximadamente 52 000 m³, el vaso tiene la capacidad de retener aproximadamente 90% de los sedimentos que entran por escurrimientos urbanos y aguas residuales. Como el volumen anual de sedimentos que entran en el vaso Cencali es de 4 500-5 000 m³/año (Hansen *et al.*, 2007), es necesario hacer un mantenimiento continuo del vaso, el cual puede consistir en el dragado y secado de sedimentos.

Ya que la geometría del vaso Cencali no es la ideal para un sedimentador y el agua ingresa por tres diferentes entradas, una futura opción para facilitar el manejo del vaso es la optimización de la geometría interna, creando una zona de sedimentación que facilite la remoción de los sedimentos que ingresen anualmente, tal como se muestra en la ilustración 15.

Reúso de sedimentos y medidas adicionales a largo plazo

Para la reducción de la cantidad de sedimentos que entran al vaso se podría aplicar la tecnología de infiltración de aguas pluviales en zonas no selladas dentro de la cuenca del vaso. Para la carga orgánica y de nutrientes, el concepto del saneamiento incluye la reparación de fugas y la renovación de la red de drenaje de la ciudad, separando las aguas residuales de las pluviales, y sometiendo las aguas residuales a tratamiento adecuado antes de ser descargadas a los ríos. Asimismo,

Ilustración 15. Fondo del vaso Cencali con zona de sedimentación.



se podría implementar la aplicación de coagulantes después del dragado y/o aireación, y/o remoción de nutrientes por filtros biológicos. Es importante que esto se utilice sólo después de la remoción de sedimentos, permitiendo así disminuir los problemas de eutroficación del sistema lagunar.

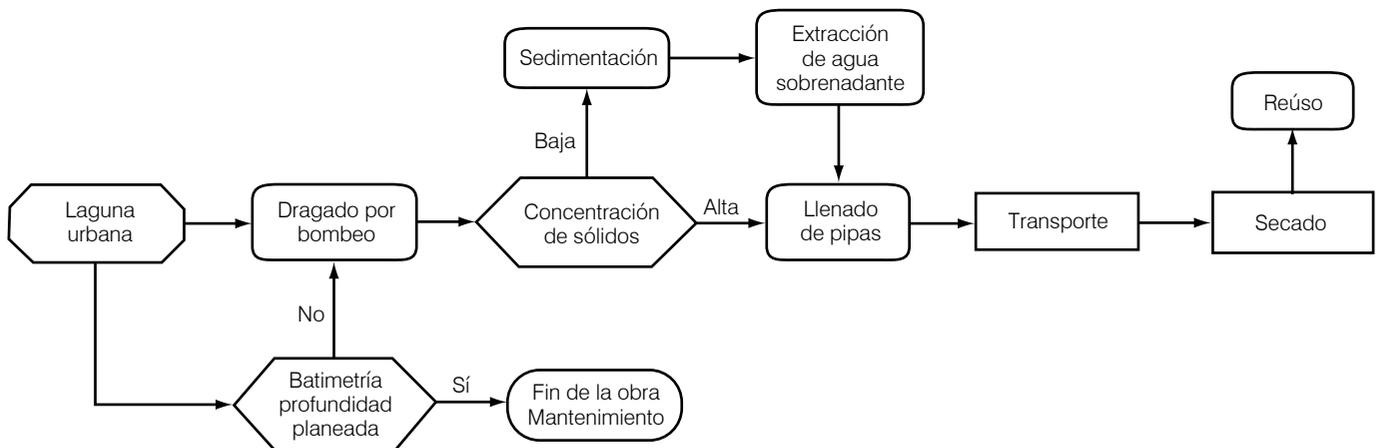
Conclusiones

La rehabilitación de lagunas urbanas requiere de un análisis integral de las causas y los riesgos particulares relacionados con cada problemática, así como el desarrollo y la adaptación de tecnologías a las condiciones locales, los tiempos y el presupuesto disponibles para las obras de saneamiento.

El sistema diseñado que se presenta en este trabajo no necesariamente es exclusivo para el vaso Cencali, ya que puede ser adaptado y aplicado a lagunas urbanas con problemática similar. En general, el sistema de remoción de sedimentos se puede esquematizar como un ciclo continuo, tal como se presenta en la ilustración 16.

Desde la concepción de la obra debe considerarse que el saneamiento de lagunas urbanas no siempre es un proceso sencillo, estará afectado por aspectos de diversa índole que, además de los aquí mencionados, incluyen las características de los sedimentos a extraer, ya que de éstos depende la metodología y los equipos requeridos para su extracción y transporte. Debe procurarse un alto rendimiento en los procesos, pues, de lo contrario, tendrían implicaciones desfavorables en los tiempos de ejecución de las obras y en sus costos.

Ilustración 16. Esquema general propuesto para la remoción de sedimentos del vaso Cencali.



Otro aspecto importante durante la ejecución de las obras de saneamiento de lagunas urbanas es la capacidad y calificación tanto de los equipos disponibles como del personal encargado de las obras, puesto que son estos últimos los responsables de la operación de los equipos y de ajustarse a la logística preestablecida para la obra, sobre todo cuando el saneamiento se compone de varios procesos, como los presentados en el presente trabajo.

La adecuada aplicación de la metodología de saneamiento diseñada en este trabajo mostró resultados satisfactorios tanto en el rendimiento y la eficiencia del proceso, especialmente en el bombeo con alta concentración de sólidos, como en la adaptabilidad y operabilidad en situaciones adversas de espacio, tiempo y presupuesto, lo cual puede ser aplicada a otros casos en los que se den condiciones similares a las del vaso Cencali.

Agradecimientos

Agradecemos a los biólogos Andrés Pedrero, José Antonio Germán y al ingeniero Julio Figueroa de SEDESPA; al maestro en ciencias Luis Carlos González Márquez, y a los ingenieros Nicolas Chapelain y Ricardo Álvarez (IMTA), así como a Pablo A. Delgadillo Reynoso y Miguel A. Rojas Esquivel de Servicios de Ingeniería e Informática S.C.

Recibido: 18/07/2006

Aprobado: 01/02/2007

Referencias

- CNA. *Datos de precipitación diaria en el centro de la ciudad de Villahermosa. Estaciones: clave 27054 y 27055. Periodo: de 1926 a 1997*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2002.
- FAUNAGUA. Desarrollo de herramientas de manejo para lagunas urbanas y semi-urbanas en el Valle de Cochabamba (Bolivia) [en línea] <http://www.faanagua.org/spanish/proyectos/manlake.htm>, 2004.
- HANSEN, A. M., VAN AFFERDEN, M. y TORRES-BEJARANO, F. Saneamiento del vaso Cencali, Villahermosa, Tabasco. I. Contaminación y reúso de sedimentos. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXII, núm. 3, octubre-diciembre de 2007, pp. 87-102.
- KNIGHT, D. Ambiente: lagos del mundo en estado crítico. *Tierramérica, medio ambiente y desarrollo* [en línea] <http://www.tierramerica.net/2001/1118/noticias3.shtml>, 2001.
- 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*. Abschlussbericht F&E Vorhaben FKZ 299 24 274, Umweltbundesamt, 2003, pp. 1056.
- PIRANHA PUMPS. *Home Page* [en línea] <http://www.piranhapumps.com/index.html>, 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, pp. 151.

Abstract

VAN AFFERDEN, M., HANSEN, A.M. & TORRES-BEJARANO, F. *Remediation of the Cencali lagoon, Villahermosa, Tabasco. II. Process design.* Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 1, January-March, 2008, pp. 57-70.

This paper is the second of a two parts describing the activities and research carried out during the evaluation and design of the remediation process of the Cencali lagoon in the center of Villahermosa, Tabasco., Mexico. The hypereutrophic status of this water body is mainly caused by the accumulation of large amounts of sediments originated from inflows of urban drainage and wastewater. Therefore, an emergency remediation concept was developed that focuses mainly on sediment dredging. The location of the lagoon, the reduced space available in adjacent zones, as well as the sediment characteristics prevented a traditional process design. For that reason, a process consisting of pump dredging, sedimentation, transport, and drying of sediments was designed and adapted. According to sediment humidity analyses and pilot pumping experiments, the dredged sediment suspension had a humidity between 65 and 85%, resulting in volumes to be removed between 50,400 and 130,000 m³. In order to control and reduce the volume of transported sediments and thereby avoiding excessive time and costs, a sedimentation technology was designed consisting in four floating-submerging tanks placed in the Cencali lagoon. In addition, a maintenance concept was proposed consisting of a combination of sedimentation and dredging processes in a topographical depression excavated in the lagoon.

Keywords: urban lagoons, dredging, sedimentation, sediment transport and disposal.

Dirección institucional de los autores:

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

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

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