



CONAGUA

Comisión Nacional del Agua

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Dirección Técnica.



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

SEMARNAT

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO
DIRECCIÓN TÉCNICA
SUBGERENCIA DE CALIDAD DEL AGUA E IMPACTO AMBIENTAL

RESUMEN EJECUTIVO

**“CARACTERIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA PRESA VALLE DE BRAVO,
ESTADO DE MÉXICO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS DE CONTROL
DE NUTRIENTES. 2ª ETAPA”**

Convenio No. OAVM-DT-MEX-10-441-RF-CC

Supervisión: Ing. Juan Manuel Martínez Jiménez

Responsable técnico: Dra. Anne M. Hansen

Participantes: M. en I. Henri Márquez Pacheco
I.Q. Axel Falcón Rojas
Ing. José Trinidad Villanueva Beltrán
M. en I. Arturo Hernández Antonio
M. en I. Carlos Corzo Juárez

Noviembre de 2010



CONAGUA

Comisión Nacional del Agua

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Dirección Técnica.



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

SEMARNAT

CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Productos por obtener.....	2
2. Evaluación de la carga interna de fósforo en la presa y comparación con la carga externa.....	2
2.1 Estimación de carga interna	3
2.2 Estimación de la reducción de nutrientes bajo diferentes escenarios de control de carga externa.....	8
3. Evaluación de las eficiencias y dosis óptimas de adsorbentes naturales para adsorber fósforo e inmovilizarlo en los sedimentos.....	12
4. Estimación de costos de tratamiento	14
5. Conclusiones y recomendaciones.....	16
6. Referencias	17



IMTA®
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo, Estado de México y evaluación de diferentes técnicas de control de nutrientes

TABLAS

Tabla 1.	Carga interna de fósforo en base a concentraciones medidas de campo	9
Tabla 2.	Carga interna de fósforo en base a variaciones de potencial redox.....	9
Tabla 3.	Fósforo potencialmente disponible en base a extracción secuencial Psenner	10
Tabla 4.	Aportación de contaminantes por cargas externas	10
Tabla 5.	Estimación de escenarios de control para la reducción de contaminantes.....	11
Tabla 6.	Estimación de Phoslock requerida para el saneamiento de agua y sedimentos en la presa Valle de Bravo	15
Tabla 7.	Presupuesto para el saneamiento	15

FIGURAS

Figura 1.	Croquis de la presa Valle de Bravo con estaciones de muestreo	3
Figura 2.	Potencial redox en agua de fondo	4
Figura 3.	Potencial redox en sedimentos.....	4
Figura 4.	Fósforo total en agua para diferentes potencial redox.....	5
Figura 5.	Fósforo total en agua de fondo	5
Figura 6.	Distribución de fósforo en sedimentos de la presa Valle de Bravo. Cortesía del Instituto de Limnología Dr. Nowak, Alemania.....	7
Figura 7.	Remoción de fósforo en experimentos batch.....	12
Figura 8.	Experimentos en columnas para remoción de fósforo.....	13
Figura 9.	Remoción de fósforo en experimentos en columnas de agua. Relación adsorbente:P-PO ₄ 100:1	14

1. Introducción

En lagos eutrofizados, la carga interna puede representar una cantidad importante con respecto a la carga total de nutrientes (Moore *et al.*, 1998). En algunos casos, la reducción de carga externa no tiene el efecto deseado sobre la calidad del agua, debido a la cantidad de nutrientes que se liberan de los sedimentos (Schauser *et al.*, 2003; Steinman y Ogdahl, 2008).

Los procesos que conducen a la liberación de fósforo de los sedimentos a la columna de agua, incluyen la desorción y la disolución del nutriente adsorbido en material inorgánico mediante reacciones de óxido-reducción, mineralización microbiana de la materia orgánica y difusión de fósforo disuelto en el agua intersticial de los sedimentos (Jensen y Andersen, 1992).

El principal proceso que origina las condiciones reducidas, es el consumo de oxígeno por degradación de la materia orgánica. Aunado a la liberación de fósforo por degradación de materia orgánica, las condiciones reducidas causan también la disolución reductiva de minerales inorgánicos de hierro y manganeso y la consecuente liberación de fósforo asociado a estas partículas (Moore *et al.*, 1998; Miao *et al.*, 2006; Heggie *et al.*, 2008).

CONAGUA-IMTA (2009) evaluaron las cargas de nutrientes a la presa Valle de Bravo, encontrando que existe una importante aportación de nutrientes por carga externa y que se requiere contar con información de variaciones en potencial redox durante el año, para poder estimar la carga interna.

Las principales fuentes de contaminación en la cuenca hidrológica son descargas de aguas residuales, sustancias químicas utilizadas en la agricultura y desechos orgánicos y nutrientes de la acuacultura (CCVB-A, 2010 y CONAGUA-IMTA, 2009).

De acuerdo a Ramírez-Zierold *et al.* (2010) el 85% del fósforo de la carga externa se acumula en los sedimentos de la presa Valle de Bravo. El fósforo se acumula principalmente en los sólidos finos, que se depositan en las zonas más profundas, representando una fuente de carga interna de fósforo durante periodos de estratificación (CONAGUA-IMTA, 2009).

1.1 Objetivo

Extrapolar los resultados de liberación de nutrientes a las condiciones de la presa y evaluar las eficiencias y dosis óptimas de aplicación de adsorbentes naturales inocuos para reducir el fósforo en la columna de agua e inmovilizarlo en sedimentos de la Presa Valle de Bravo.

1.2 Productos por obtener

- Evaluación de la carga interna de fósforo en la presa y comparación con la carga externa
- Estimación de la reducción de nutrientes bajo diferentes escenarios de control de carga externa
- Adsorbente recomendado, dosis óptimas de aplicación y estimación de la reducción de fósforo
- Costo de tratamiento

2. Evaluación de la carga interna de fósforo en la presa y comparación con la carga externa

Se evaluó la carga interna de fósforo por variación en potencial redox. Los resultados fueron verificados con resultados de los muestreos periódicos realizados en la presa y con la determinación de fósforo potencialmente disponible en sedimentos por extracción secuencial Psenner.



CONAGUA

Comisión Nacional del Agua

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Gerencia Técnica.



2.1 Estimación de carga interna

Con el objetivo de evaluar la carga interna de fósforo en la presa Valle de Bravo, a partir del mes de febrero se realizaron muestreos de agua y sedimentos en 23 estaciones de muestreo (Figura 1), con una frecuencia de aproximadamente cinco semanas. Los resultados indican que en la presa se presentó estratificación marcada con diferencias en temperatura de 5 °C entre superficie y fondo en el periodo comprendido entre las semanas 22 y 34 (junio a agosto) mientras que en las semanas 45 y 50 se observa mezcla completa de la columna de agua. El mayor cambio en temperatura se presenta entre 5 y 15 m de profundidad durante el periodo de máxima estratificación.

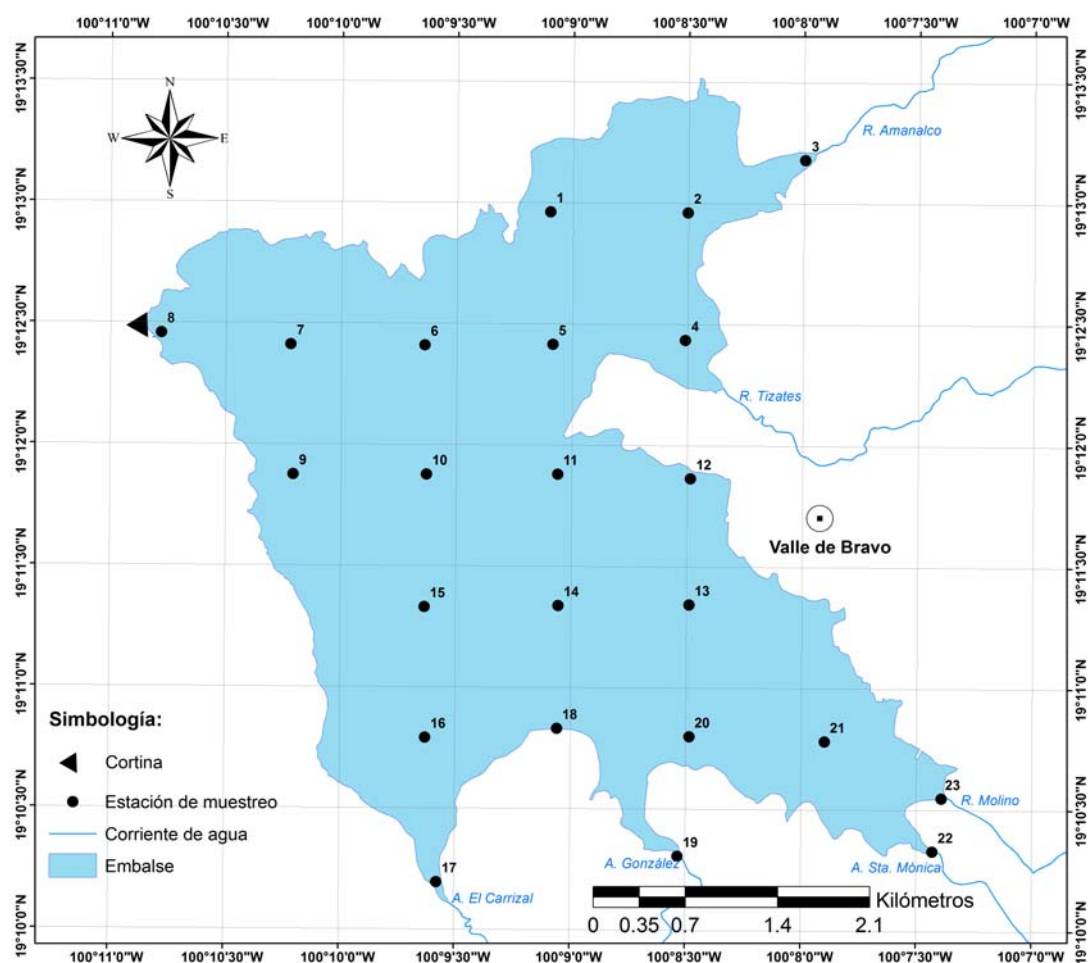


Figura 1. Croquis de la presa Valle de Bravo con estaciones de muestreo



IMTA
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo, Estado de México y evaluación de diferentes técnicas de control de nutrientes. 2ª Etapa

El potencial redox (Eh) en agua de fondo y en sedimentos disminuye en el periodo de febrero y junio y es principalmente negativo en periodo entre la semana 29 y la 45 (de julio a noviembre) (Figura 2 y Figura 3).

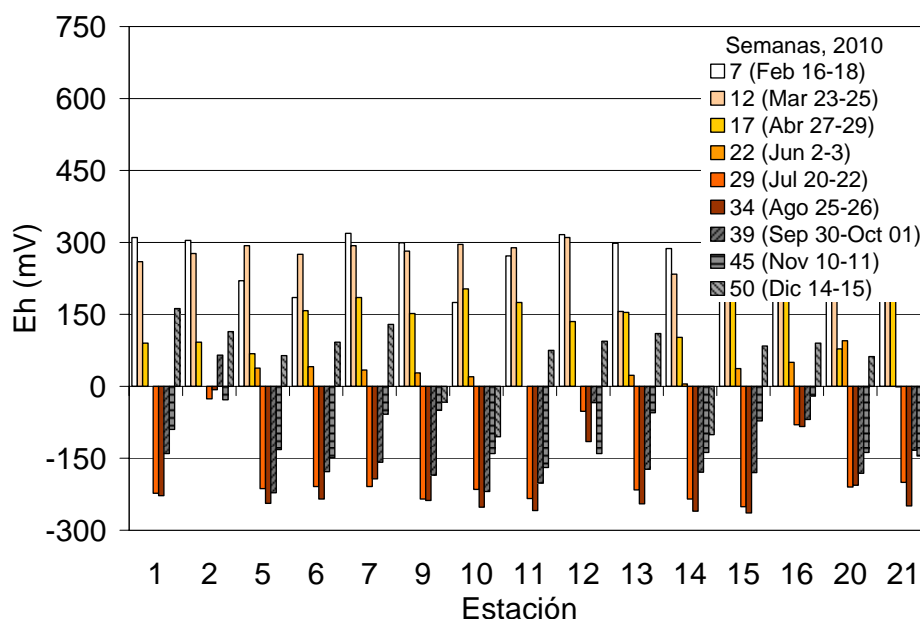


Figura 2. Potencial redox en agua de fondo

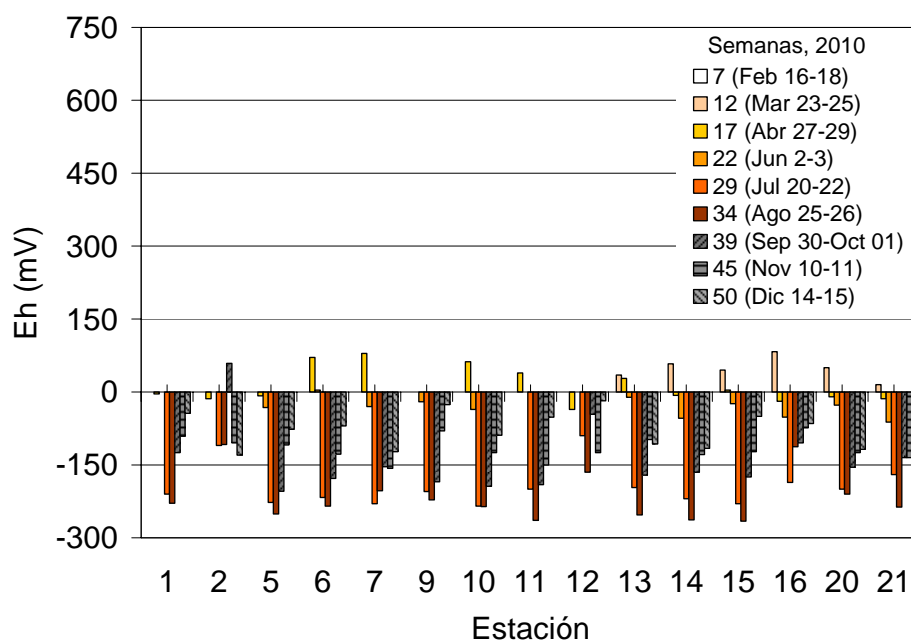


Figura 3. Potencial redox en sedimentos

Las concentraciones de fósforo en la presa aumentan conforme los potenciales redox disminuyen (Figura 4). Las concentraciones de fósforo aumentan hasta el mes de julio, cuando el cuerpo de agua se clasifica entre eutrófico e hipereutrófico (Figura 5).

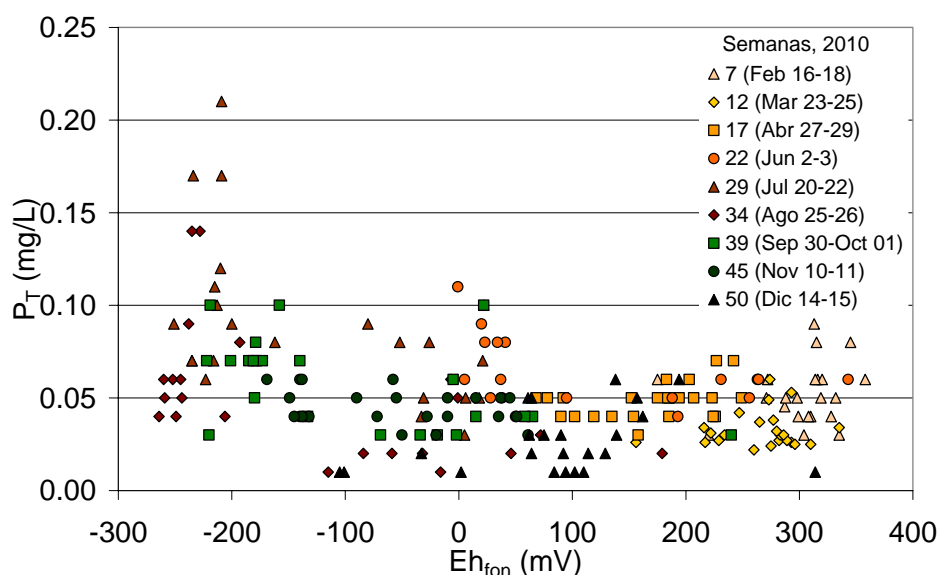


Figura 4. Fósforo total en agua para diferentes potencial redox

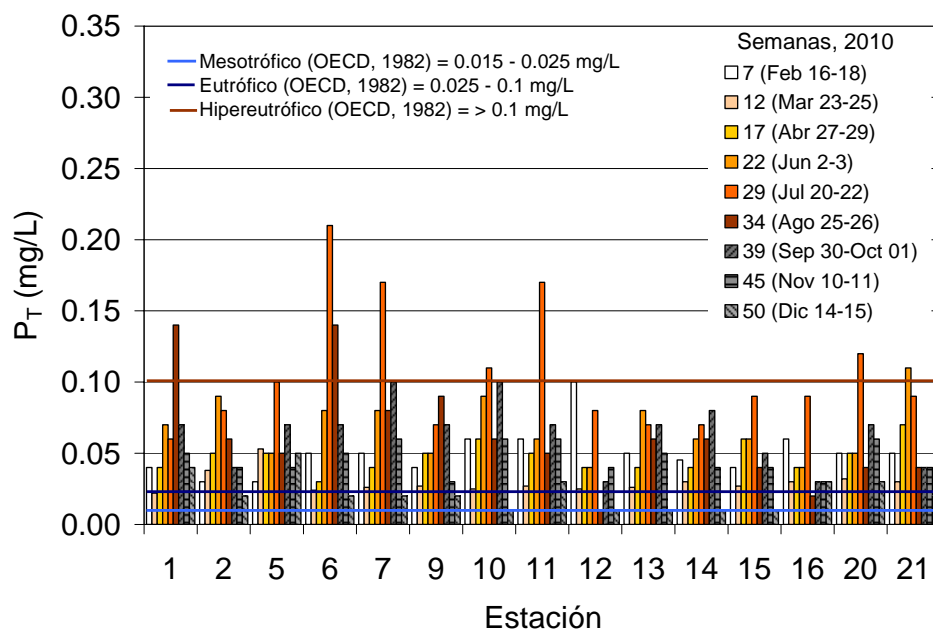


Figura 5. Fósforo total en agua de fondo

De febrero a julio se observó un incremento en la concentración de fósforo en agua de fondo de aproximadamente 77%, mientras que en agua de superficie y agua de profundidad media, este incremento fue de ~ 76 y 65 %, respectivamente.

Se realizó un balance de fósforo para cada evento de muestreo, donde las entradas a la presa fueron la carga externa de la cuenca hidrológica (descrita en el subcapítulo 2.2), las entradas por lluvia y la carga interna. Las salidas fueron las extracciones y la acumulación de fósforo en sedimentos. Los resultados de este balance se presentan en la (Tabla 1). Considerando que los valores negativos representa la desaparición de fósforo de la columna de agua por acumulación en sedimentos y bioacumulación, se obtuvo la carga interna en el periodo con base a concentraciones de campo, sumando los valores positivos, resultando en 4.9 t para el periodo de abril a diciembre.

Para estimar la carga interna de fósforo en base a variaciones de Eh, se extrapolaron los resultados de liberación de fósforo (CONAGUA-IMTA, 2009), considerando un espesor de sedimentos de 6 cm y las variaciones en potencial redox en sedimentos medidas durante los muestreos periódicos (Figura 3). Los resultados de carga interna para el periodo de abril a diciembre varían entre 0.25 y 1.59 t de fósforo, indicando un incremento durante el periodo abril a agosto y una disminución a partir del mes de septiembre (Tabla 2). Se estima la mayor carga interna en los meses de julio y agosto, cuando se encuentran potenciales redox más negativos. La carga interna estimada para el periodo de abril a diciembre fue de 5.9 t.

Mediante extracción secuencial (Psenner *et al.*, 1984) de muestras de sedimentos de las estaciones 7, 13 y 21 (Figura 1), se caracterizó la distribución y el potencial de lixiviación de fósforo (Figura 6). Se observa que aproximadamente 35% del fósforo contenido en los sedimentos se encuentra como P disponible que potencialmente puede liberarse por procesos de reducción y biodegradación (fracciones representadas con puntos). En el perfil de sedimentos de la estación 13, a partir de una profundidad de 6 cm, la concentración de fósforo potencialmente disponible se mantiene constante

mientras que en el perfil de la estación 7 se observa una concentración de fósforo potencialmente disponible semejante a la concentración en sedimento superficial. Por lo anterior se consideró que la lixiviación de fósforo ocurre en una capa de 6 cm.

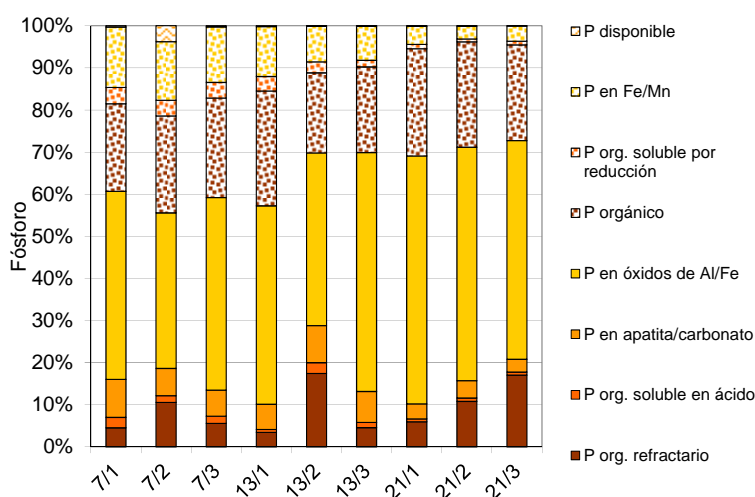


Figura 6. Distribución de fósforo en sedimentos de la presa Valle de Bravo. Cortesía del Instituto de Limnología Dr. Nowak, Alemania

Considerando la concentración promedio de fósforo de 951 mg/kg (CONAGUA-IMTA, 2009) y el peso seco de 0.07 t/m³ medido en esta capa de sedimentos, se estimó que la cantidad de fósforo que potencialmente puede lixivarse, es de 27.57 t. Aplicando los resultados de experimentos de liberación de fósforo en función de Eh (CONAGUA-IMTA, 2009), donde se lixivió el 1% del Fe total y se degradó 25% de la MO, se estimó una carga interna de 5.57 t (Tabla 3). En resumen, se obtuvieron cargas internas para el periodo de abril a diciembre mediante tres diferentes métodos, que varían entre 4.9 t con base a concentraciones de campo, 5.9 t estimada por variaciones en Eh y 5.57 t por extracción secuencial. Se observa que las tres estimaciones son del mismo orden de magnitud.

Wetzel (2001) sugiere que 25% de la carga externa de fósforo en cuerpos de agua se encuentra como fósforo disuelto y 75%, como fósforo asociado a partículas. Considerando esta distribución, se estimó la carga externa de fósforo disuelto en la presa Valle de Bravo, de 16.5 t/año. Considerando que 27.57 t de fósforo en los sedimentos se encuentra potencialmente disponible, resulta muy importante buscar la forma de eliminar esta entrada de fósforo al agua la presa.

2.2 Estimación de la reducción de nutrientes bajo diferentes escenarios de control de carga externa

La carga externa de nutrientes estimada en la 1ra etapa del proyecto fue actualizada tomando en cuenta la población para el 2010 (CONAPO, 2006), estimación de volúmenes de escurrimiento y la consideración de que existe un equilibrio entre los nutrientes removidos por el pastoreo y los devueltos por estiércol (Bellows, 2001). Los resultados actualizados se presentan en la Tabla 4.

Para pronosticar las variaciones en carga externa por cambios en actividades y usos de suelos en la cuenca, se consideró lo siguiente: Escenario 1. 20% de reforestación en la subcuenca del río Molino, Escenario 2. 20% de aumento en actividades porcícolas y trutícolas en toda la cuenca, Escenario 3. Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo, Escenario 4. Aumento a 95% de cobertura de redes de agua para consumo humano y 90% de alcantarillado en Valle de Bravo y Amanalco e incremento de eficiencias de tratamiento para remoción de 50% de P y N y Escenario 5. Tratamiento descentralizado de 50% del agua residual generada por pequeñas localidades en la cuenca.

La reducción en carga externa varía entre 0.2 y 11% para P_T , y entre 0.9 y 10% para N_T , presentando mayor eficiencia el escenario 4 (Tabla 5). Considerando todos los escenarios para el control de carga externa se podría lograr una reducción de 22.2 t/año de P_T , lo cual representa a 34% de reducción de la carga externa total.

Tabla 1. Carga interna de fósforo en base a concentraciones medidas de campo

Fechas	Carga externa (t/periodo)	Lluvia (t/periodo)	Efluente (t/periodo)	Sedimentación (t/periodo)	P _T en el embalse (t/periodo)	ΔP _T (t/periodo)	Carga interna (t/periodo)
Semana 7 (Feb 16-18, 2010)		-	-	-	14.90	-	-
Semana 12 (Mar 23-25, 2010)	7.78	0.002	0.58	1.50	10.37	-4.53	-10.23
Semana 17 (Abr 27-29, 2010)	5.41	0.004	0.76	1.51	13.90	3.53	0.40
Semana 22 (Jun 2-3, 2010)	7.81	0.055	0.95	1.53	15.96	2.06	-3.32
Semana 29 (Jul 20-22, 2010)	12.70	0.061	2.24	2.07	28.89	12.93	4.48
Semana 34 (Ago 24-26, 2010)	10.51	0.061	1.31	1.51	25.49	-3.40	-11.16
Semana 39 (Sep 30-Oct 01, 2010)	8.05	0.050	0.77	1.61	15.56	-9.93	-15.66
Semana 45 (Nov 10-11, 2010)	6.69	0.006	0.89	1.77	16.13	0.57	-3.47
Semana 50 (Dic 14-15, 2010)	3.35	0.003	0.41	1.46	8.49	-7.64	-9.13
Total	62.3	0.2	7.9	13.0			4.9

Tabla 2. Carga interna de fósforo en base a variaciones de potencial redox

Fechas	Carga interna (mg/m ²)	Área de la presa (miles m ²)	Carga interna (t/periodo)
Semana 17 (Abr 27-29, 2010)	265	16 910	0.25
Semana 22 (Jun 2-3, 2010)	570	16 690	0.43
Semana 29 (Jul 20-22, 2010)	1373	16 880	1.41
Semana 34 (Ago 25-26, 2010)	1981	16 910	1.59
Semana 39 (Sep 30-Oct 01, 2010)	1270	17 021	0.98
Semana 45 (Nov 10-11, 2010)	708	16 928	0.74
Semana 50 (Dic 14-15, 2010)	731	17 037	0.50
Total			5.90

Tabla 3. Fósforo potencialmente disponible en base a extracción secuencial Psenner

Fracción	Fracción Psenner (%)	P _T (mg/kg)	P _T lixiviable (mg/kg)	Área del embalse (m ²)	Espesor (m)	Volumen de sedimento (m ³)	Masa de sedimento (t)	P _T potencialmente disponible (t)	PT lixiviado por reducción (%)	Carga interna estimada (t)
P disponible	0.6	951	5.7	18,000 000	0.06	1,080 000	75 600	0.50	100	0.50
P en Fe/Mn	9.0		85.3					7.09	1	0.07
P orgánico soluble por reducción	2.4		22.8					1.91	25	0.48
P orgánico	23.0		219.0					18.06	25	4.52
Total								27.56		5.57

Tabla 4. Aportación de contaminantes por cargas externas

Subcuenca	Carga de contaminantes (t/año)											
	SST			N _T			P _T			DBO		
	FP	FD	Total	FP	FD	Total	FP	FD	Total	FP	FD	Total
Río Amanalco	108.75	8 638.07	8 746.82	27.43	88.47	115.90	7.14	25.11	32.25	106.39	597.47	703.85
Río Molino	63.21	3 402.98	3 466.19	12.64	49.63	62.27	3.16	12.25	15.41	63.21	393.42	456.62
Río San Diego	17.75	504.40	522.15	3.55	7.17	10.72	0.89	1.94	2.83	17.75	64.25	82.00
A. Las Flores	0.68	399.90	400.58	0.14	5.21	5.35	0.03	1.93	1.97	18.70	53.52	72.22
A. El Carrizal	5.35	293.01	298.36	1.07	4.83	5.89	0.27	1.39	1.66	0.68	50.79	51.47
A. Yerbabuena	18.70	182.37	201.06	3.74	2.97	6.71	0.93	0.65	1.58	5.35	24.35	29.70
Laderas	170.58	310.94	481.52	34.12	4.35	38.46	8.53	1.31	9.83	170.58	41.07	211.65
Total	385.01	13 731.67	14 116.68	82.68	162.63	245.31	20.95	44.58	65.54	382.65	1 224.86	1 607.51

FP: Fuente puntual

FD: Fuente difusa



CONAGUA

Comisión Nacional del Agua

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Gerencia Técnica.



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

SEMARNAT

Tabla 5. Estimación de escenarios de control para la reducción de contaminantes

Parámetros	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4		Escenario 5	
	Reforestación de 20% de pastizales en el río Molino (t/año)	Reducción de la carga externa (%)	20% de reducción en actividades pecuarias y trutícolas	Reducción de la carga externa (%)	Separación de agua pluvial y residual en Valle de Bravo y Amanalco	Reducción de la carga externa (%)	Ampliación de la red de alcantarillado e incremento de eficiencia de tratamiento	Reducción de la carga externa (%)	Tratamiento descentralizado en pequeñas localidades	Reducción de la carga externa (%)
N _T	2.09	0.9	0	0	14.24	6	25.14	10	23.77	10
P _T	0.13	0.2	4.57	7	3.54	5	7.70	11	6.23	9
DBO	24.92	2	81.57	5	70.99	4	168.73	11	3.51	0.2
SST	100.28	0.7	220.50	2	94.23	1	165.41	2	5.87	0.04
Total (reducción de la carga de P_T (t/año) en la cuenca)										22.2



MTA
Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

3. Evaluación de las eficiencias y dosis óptimas de adsorbentes naturales para adsorber fósforo e inmovilizarlo en los sedimentos

En experimentos batch se evaluaron dos adsorbentes: Bentonita cálcica y Phoslock, que es una bentonita tratada con lantano que une fuertemente al fósforo mediante un proceso de adsorción, considerando cinco dosis diferentes (Figura 7). Se encontró que bentonita cálcica no remueve fósforo mientras que el adsorbente natural, Phoslock, remueve fósforo, alcanzando porcentajes de remoción de 94% en 30 d a partir de la dosis 100:1 Phoslock:P-PO₄.

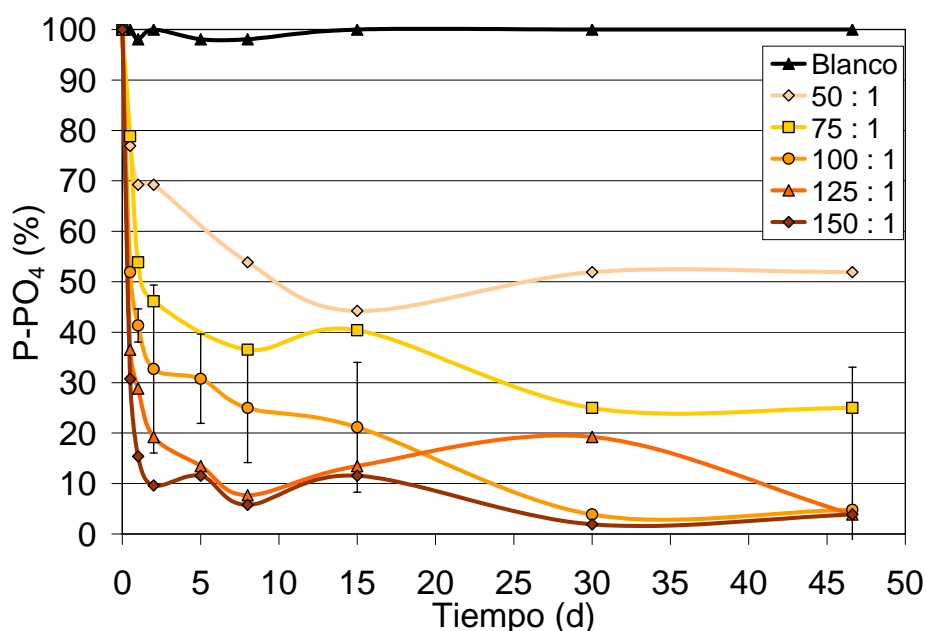


Figura 7. Remoción de fósforo en experimentos batch

En columnas de acrílico de 3 m de altura (Figura 8), se evaluó la eficiencia de Phoslock y de bentonita cálcica en la remoción de P-PO₄ en la columna de agua y la inmovilización en los sedimentos. Las muestras se obtuvieron cada 50 cm de profundidad y los resultados promedio para la columna de agua se muestran en la Figura 9.



CONAGUA

Comisión Nacional del Agua

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Dirección Técnica.



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



Figura 8. Experimentos en columnas para remoción de fósforo

Con Phoslock se tuvo una remoción de 75% de $P-PO_4$ a partir de dos semanas mientras que en el experimento con bentonita cálcica se obtuvo una remoción de 30 %. Después de 7 semanas de experimentación se establecieron condiciones anóxicas y se observó que el fósforo se mantuvo inmovilizado en los sedimentos.

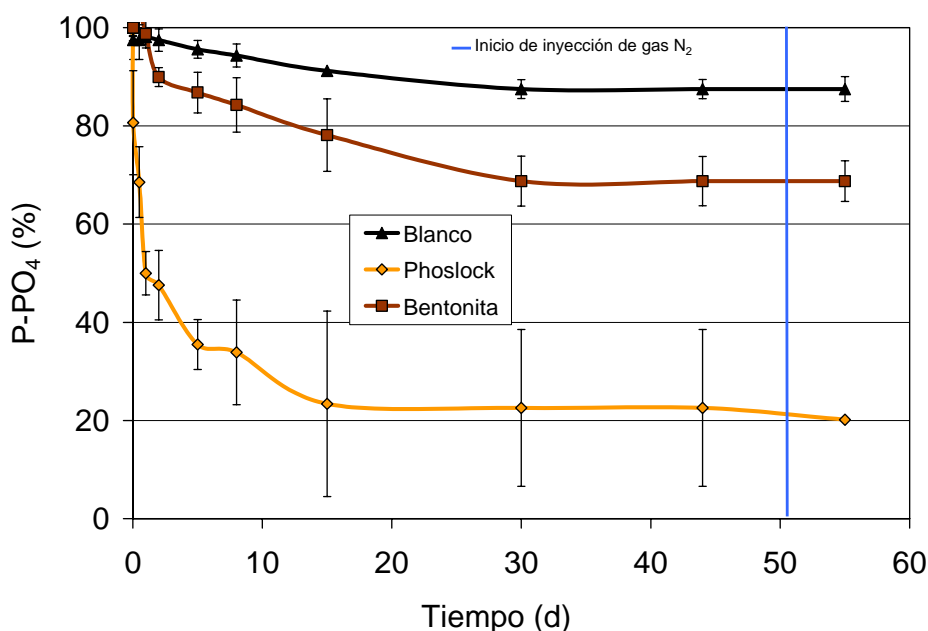


Figura 9. Remoción de fósforo en experimentos en columnas de agua. Relación adsorbente:P-PO₄ 100:1

4. Estimación de costos de tratamiento

Se calculó el costo del saneamiento por remoción e inmovilización de fósforo en la presa Valle de Bravo mediante aplicación de Phoslock. Los costos se dividieron en dos grandes rubros:

1. Adquisición, importación y transporte
2. Almacenamiento y aplicación.

La cantidad de adsorbente fue calculada para precipitar fósforo de la columna de agua y para inmovilizar fósforo que se lixivia de los sedimentos. Con la dosis a aplicar de 100:1 Phoslock:P-PO₄, se estimó que se requieren 5 164 t de Phoslock (Tabla 6), que debe aplicarse de la siguiente forma:

- 2 407.5 t en la superficie del espejo de agua
- 2 756.5 t en la interfase agua-sedimento

Tabla 6. Estimación de Phoslock requerida para el saneamiento de agua y sedimentos en la presa Valle de Bravo

Datos básicos	Estimación	
Concentración deseada de P _T en el agua (mg/L)	0.015	0.025
Superficie en 2010 (ha)	1 800	1 800
Cantidad de P en el agua, julio de 2010 (t)	28.89	28.89
Cantidad de P a alcanzar en el agua (t)	4.82	8.03
Cantidad de P a precipitar (t)	24.075	20.865
Cantidad de P a inmovilizar en sedimento (t)	27.57	27.57
Dosis recomendada	100:1	100:1
Cantidad requerida de Phoslock (t)	5 164	4 842

Tabla 7. Presupuesto para el saneamiento

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Subtotal
			(\$ M.N.)	(\$ M.N.)
Adquisición, importación y transporte				
Costo de adsorbente natural (Phoslock)	t	5,164	22,100	114,124,400
Transporte marítimo	t	5,164	1,300	6,713,200
Seguro de transporte marítimo	lote	1	671,320	671,320
Derecho de tramite aduanero	embarque	1	0.008% valor factura	9,130
Honorarios por importación	embarque	1	0.32% valor factura	365,198
Servicios complementarios	contenedor	199	1,200	238,338
Prevalidador	embarque	1	162	162
Flete terrestre	contenedor 40'	199	26,888	5,340,370
Seguro de transporte terrestre	lote	1	575,270	575,270
Almacenamiento en aduana	0.5 t	10,328	36	371,808
Maniobra	contenedor	199	8,000	1,588,923
Subtotal				129,998,120
Almacenamiento y aplicación				
Renta de almacén de 6000 m²	año	1	2,520,000	2,520,000
Personal de vigilancia	año	1	470,000	470,000
Flete Toluca-Valle de Bravo	viaje	258	5,000	1,291,000
Renta de almacén para operación (1000 m²)	mes	7	30,000	210,000
Seguro de almacenes y transporte local	lote	1	835,493	835,493
Oficina movil	mes	4	15,000	60,000
Renta de casa para residente	mes	4	15,000	60,000
Renta de sanitarios	mes	4	4,000	16,000
Renta montacargas	mes	4	20,000	80,000
Camionetas (3 t)	unidad	2	350,000	700,000
Barcaza (3.66x7.62 m) con motor modelo Honda ENGINE	unidad	3	1,157,000	3,471,000
Traslados de barcasas	lote	3	585,000	1,755,000

Tolva, incluye: combustible, aditivos, puesto en sitio y todo lo necesario para su correcto funcionamiento	lote	3	80,000	240,000
Motor de 1 HP con agitador regulado	pieza	3	12,000	36,000
Planta generadora a gasolina	pieza	3	10,000	30,000
Motobomba a gasolina (Aquor) 6.5 HP 2"	pieza	3	10,000	30,000
Combustible	lote	3	75,000	225,000
Tanques y adaptaciones de tanques	lote	3	6,000	18,000
Tubo de PVC hidráulico 2"	m	350	120	42,000
Difusor	pieza	3	2,500	7,500
Sonda eléctrica Lowrence HDS-10	pieza	3	46,000	138,000
Residente de obra	mes-hombre	4	30,000	120,000
Operadores de barcaza	mes-hombre	6	20,000	120,000
Chóferes	mes-hombre	4	12,000	48,000
Operador de montacargas	mes-hombre	4	15,000	60,000
Ayudante general	mes-hombre	30	10,000	300,000
Indirectos y utilidad de la empresa ganadora de la licitación	% de costos	25	3,220,748	3,220,748
Subtotal				16,103,741
Supervisión de obra	Lote	1	3,465,858	3,465,858
COSTO NETO				149,567,719
IVA				23,930,835
COSTO TOTAL				173,498,554

5. Conclusiones y recomendaciones

La carga interna de fósforo obtenida por variación de potencial redox en sedimentos de abril a diciembre, fue de 5.9 t. Este valor fue confirmado por mediciones en campo y extracción secuencial de fósforo en sedimentos. La carga externa de fósforo se estimó en 66 t/año. Suponiendo que 25% de este fósforo se encuentra en forma disuelta, la carga externa de fósforo disuelto se estimó en 15.58 t para el mismo periodo.

Se confirmó que la dosis óptima del adsorbente natural Phoslock, es de 100:1, es decir que por cada tonelada de fósforo que se requiere inmovilizar, se requiere de 100 t de Phoslock. La cantidad de adsorbente fue calculada para precipitar fósforo de la columna de agua y para inmovilizar fósforo que se lixivia de los sedimentos. La cantidad total de fósforo a eliminar de la columna de agua e inmovilizar en los sedimentos, se estimó en

51.64 t requiriendo de un total de 5 164 t de Phoslock. Se estimó un costo total del saneamiento de 173.5 millones de pesos, que incluye adquisición, importación y transporte del adsorbente natural así como almacenamiento, aplicación del adsorbente y supervisión.

Se estimaron cinco escenarios para reducción de la carga externa de nutrientes a la presa. Los escenarios Ampliación de la red de alcantarillado e incremento de eficiencia de tratamiento y tratamiento descentralizado en pequeñas localidades, son los dos escenarios que disminuye más la carga externa de fósforo en la presa.

Se propone continuar con el muestreo de agua y sedimentos para complementar la caracterización en un ciclo anual de la dinámica de nutrientes entre agua y sedimentos. Asimismo, en núcleos de sedimentos determinar la velocidad de sedimentación y llevar a cabo la caracterización por capas estratigráficas mediante pruebas de mecánica de suelos para determinar el grado de compactación en los estratos de los sedimentos y verificar el espesor de sedimentos que interactúa con el agua, así como el fósforo que puede liberarse a la columna de agua.

Se propone realizar pruebas de inmovilización de fósforo en la presa Valle de Bravo con Phoslock. Asimismo, se sugiere realizar pruebas para evaluar el impacto del adsorbente natural sobre organismos acuáticos y en los sedimentos.

6. Referencias

- Bellows B. 2001. Nutrient Cycling in Pastures. NCAT (National Center for Appropriate Technology), Chapter 3 Nutrient Distribution and Movement in Pastures. Disponible em World Wide Web: <http://www.attra.ncat.org/attra-pub/nutrientcycling.html>.
- CCVB-A (Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco). 2010. Presa de Valle de Bravo. Estado de México. Disponible en World Wide Web: <http://www.cuencaamanalcovalle.org/index.php?obj=secciones&IdMostrar=140>. [Consulta: octubre 2010].

- CONAGUA-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2009. Caracterización de sedimentos en la presa Valle de Bravo, Estado de México, y evaluación de diferentes técnicas de control de nutrientes. Primera etapa. Informe final. Convenio No. OAVM-DT-MEX-09-453-RF-CC.
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). 2006. Proyecciones de México 2005-2050. Disponible en World Wide Web: http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=234. [Consulta: Junio 2009].
- Heggie D.T., Logan G.A., Smith C.S., Fredericks D.J. y Palmer D. 2008. Biogeochemical processes at the sediment–water interface, Bombah Broadwater, Myall Lakes Hydrobiologia. Vol. 608, pp. 49–67.
- Jensen H.S. y Andersen F.O. 1992. Regeneration of inorganic phosphorus and nitrogen from decomposition of seston in a freshwater sediment. Hydrobiologia. Vol. 228: 71–81.
- Miao S., De Laune R.D. y Jugsujinda A. 2006. Influence of sediment redox conditions on release/solubility of metals and nutrients in a Louisiana Mississippi River deltaic plain freshw ater lake, Sci. Total Environ., vol. 371, núm. 1-3, pp. 334-343.
- Moore P.A., Reddy K.R. y Fisher M.M. 1998. Phosphorus flux between sediment and overlying water in Lake Okeechobee, Florida: spatial and temporal variation. Journal of Environmental Quality, vol. 27, pp. 1428–1439.
- Psenner R., Puesko R. y Sager M. 1984. Die Fractionierung Organischer and Anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten Versuch einer Definition Okologisch Wichtiger Fractionen, Arch. Hydrobiol. Vol 10, pp. 115–155.
- Ramírez-Zierold J.A., Merino-Ibarra M., Monroy-Ríos E., Olson M., Castillo F.S., Gallegos M.E. y Vilaclara G. 2010. Changing water, phosphorus and nitrogen budgets for Valle de Bravo reservoir, water supply for Mexico City Metropolitan Area: Lake y Reservoir Management. Vol. 26, pp. 23-34.
- Schauser I., Lewandowski J. y Hupfer M. 2003. Decision support for the selection of an appropriate in-lake measure to influence the phosphorus retention in sediments. Water Research. Vol. 37, pp. 801–812.
- Steinman A. y M. Ogdahl. 2008. Ecological Effects after an Alum Treatment in Spring Lake, Michigan. J. Environ. Qual. 37: 22–29.
- Wetzel R. G. 2001. Limnology: Lake and river ecosystems. 3a. Edición. Academic Press, San Diego, USA.