

# **ANÁLISIS DE LA SEDIMENTACIÓN Y ESTRATEGIAS PARA EL DRAGADO DE LOS EMBALSES LOÍZA Y DOS BOCAS**

Preparado por  
*Ferdinand Quiñones, PE*  
23 de febrero de 2009

## **RESUMEN EJECUTIVO**

Este informe incluye un análisis de alternativas para el dragado de los embalses Loíza y Dos Bocas. Estos dos embalses proveen la mayor parte del agua que utilizan las plantas de filtración en la Zona Metropolitana de San Juan. Ambos embalses sufren de sedimentación acelerada que ha reducido significativamente su capacidad y su rendimiento seguro durante sequías.

1. La capacidad actual de Loíza es de 14.87 MM<sup>3</sup>, mientras que la de Dos Bocas es de 15.98 MM<sup>3</sup>. La vida útil de Loíza es de 46 años, mientras que la de Dos Bocas es de 48 años.
2. La tasa de sedimentación anual promedio de Loíza es de 310,000 M<sup>3</sup>, mientras que la de Dos Bocas es de 321,000 M<sup>3</sup>. En diez (10) años la capacidad de Loíza se reducirá a un mínimo de 11.77 MM<sup>3</sup>, mientras que la de Dos Bocas mermará a 12.77 MM<sup>3</sup>. Estas mermas en capacidad pudieran ser mucho mayores de ocurrir huracanes ó vaguadas que descarguen cantidades extraordinarias de sedimentos a uno ó ambos embalses, como ocurrió en el Embalse Loíza durante la vaguada del 22-24 de septiembre de 2008. El rendimiento seguro de ambos embalses se reducirá drásticamente en los próximos diez (10) años si no se lleva a cabo el dragado. Esto impactará severamente la disponibilidad de agua a la ZMSJ durante sequías.

Las alternativas principales de dragado evaluadas incluyen:

1. Dragar ambos embalses en períodos cortos de hasta dos años extrayendo la mayor parte de los sedimentos acumulados, tal como se llevó a cabo anteriormente en Loíza en el 1997-98. El costo estimado del dragado de 6 MM<sup>3</sup> en Loíza usando esta alternativa sería de aproximadamente \$90 millones. El costo en Dos Bocas para dragar hasta 16 MM<sup>3</sup> sería de aproximadamente \$250 millones. Estos costos impactarían severamente el presupuesto de la AAA.

2. Dragar en etapas anuales ambos embalses, contratando por períodos de hasta 20 años a empresas privadas que provean el equipo y personal necesario para extraer hasta 750,000 M<sup>3</sup> de sedimentos por año en cada embalse. Esta cantidad de sedimentos a dragarse excede la acumulación anual promedio que ocurre al presente, deteniendo la pérdida de capacidad que ocurre al momento permitiendo comenzar a recobrar progresivamente la capacidad perdida dentro de un presupuesto potencialmente viable a la AAA. Sin tomar en cuenta el valor económico potencial de la arena y grava en los sedimentos a dragarse (que puede ser sustancial), esta alternativa costaría a la AAA aproximadamente \$15 millones anuales en cada embalse, lo cual es potencialmente más viable en su presupuesto que la alternativa de dragado acelerado.
3. Además de las alternativas antes indicadas, el informe incluye recomendaciones para actividades que resultarían en reducir la tasa de sedimentación de ambos embalses, incluyendo:
  - a. Evaluar la construcción de barreras hidráulicas que precipiten parte de los sedimentos aguas arriba de los remansos de Loíza y Dos Bocas. Es mucho menos costoso extraer el material del cauce de un río en fosas de detención de sedimentos que del embalse.
  - b. Evaluar en el caso de Loíza la viabilidad técnica de la estrategia propuesta por la empresa GME de usar crecientes periódicas para remover parte de los sedimentos acumulados. Si un análisis numérico independiente demuestra la viabilidad hidráulica del proceso, se debe llevar a cabo una demostración piloto.
4. El informe también incluye recomendaciones para iniciar los procesos de permisos para el dragado de ambos embalses. El proceso de permisos para el Embalse Loíza será simple y relativamente rápido, ya que envuelve renovar y actualizar los permisos antes emitidos. En el caso de Dos Bocas, este proceso tomará aproximadamente dos (2) años, pues requiere una Declaración de Impacto Ambiental compleja y un Permiso Federal del Cuerpo de Ingenieros, además de otros permisos y endosos de agencias locales y federales.

## 1. Trasfondo de los embalses Loíza, Caonillas, Dos Bocas y La Plata:

La siguiente tabla resume las características principales y condiciones actuales de estos cuatro embalses.

**Tabla 1. Características principales de los embalses que suplen agua a la Zona Metropolitana de San Juan.**

EMBALSE	Año Construcción	Capacidad Inicial (millones metros cúbicos, MM <sup>3</sup> )	Capacidad Estimada Actual (millones metros cúbicos, MM <sup>3</sup> )	Rendimiento Seguro (millones de galones por día, MGD)	Vida Útil Estimada (años)
Caonillas	1948	55.65	40.17	70	156
Dos Bocas	1942	37.51	15.98	52	48
La Plata	1974	40.23	33.31	69	166
Loíza	1953	26.78	14.87	60	46

Fuente: USGS (2004, 2005; DRNA, 2005; Quiñones, 2008)

### Notas a la Tabla 1:

- Las capacidades iniciales se obtuvieron de los estudios del USGS y el DRNA (Plan Integral de Aguas de 2008).
- Las capacidades actuales se obtuvieron de los estudios del USGS ajustadas al 2009 en base a la tasa promedio de sedimentación anual en dichos estudios.

### a. Plantas de Filtración de la AAA que reciben agua de estos embalses y cantidad promedio diario de producción (estimado):

**Tabla 2. Plantas de filtración abastecidas por los embalses Loíza, La Plata y Dos Bocas.**

EMBALSE	Planta Filtración Abastece	Extracción Promedio Diaria (mgd)	Pueblos que Sirve la PF
Caonillas	Utado, Santiago Vázquez	5	Utado
Dos Bocas	Santiago Vázquez	100	Región Norte, Central
La Plata	La Plata	70	Bayamón,
Loíza	Sergio Cuevas	90+	San Juan, Carolina

**b. Importancia de los embalses que suplen agua a la Zona Metropolitana de San Juan:** Estos cuatro embalses proveen aproximadamente el 43 % de toda el agua cruda que la AAA extrae en la Isla (267 mgd de 612 mgd totales en el 2004). Si asumimos la extracción per cápita promedio de 160 galones por persona por día (gppd) de la AAA en toda la Isla, aproximadamente 1.67 millones de habitantes dependen casi totalmente de estos embalses como fuente de agua potable. Más importante aún, las plantas de filtración alimentadas por estos embalses proveen hasta 230 mgd de agua potable a la ZMSJ. Esto representa hasta el 89% del agua que recibe la ZMSJ. Es evidente que la pérdida de capacidad de estos embalses, particularmente Loíza y Dos Bocas, combinada con una sequía severa en las cuencas que los nutren, pudiera resultar en reducciones en el servicio de agua potable a las comunidades de la ZMSJ

Como puede apreciarse de los datos en estas tablas, los embalses más críticos en cuanto a sedimentación y pérdida de capacidad son Dos Bocas y Loíza. La Plata ha perdido aproximadamente el 15 % de su capacidad original, por lo que su condición no es crítica, aunque áreas importantes en la parte de arriba del embalse reflejan sedimentos visibles. Caonillas mantiene el 74 % de su capacidad y, excepto por las áreas cercanas al túnel (*penstock*) de entrada a las turbinas en la presa, su situación no requiere atención inmediata. En Caonillas es necesario evaluar la altura de los sedimentos en relación a la entrada del “penstock” para asegurar que no se afecte el flujo de agua hacia las turbinas y a Dos Bocas. En La Plata y Caonillas la mayor parte de los sedimentos acumulados están en la “zona muerta” de los mismos, aunque reflejan tasas elevadas de acumulación de sedimentos.

**2. Alternativas para la Restauración de la Capacidad de los Embalses en Puerto Rico:** Existen varias alternativas potenciales para restaurar la capacidad de los embalses en Puerto Rico. Estas alternativas incluyen:

a. **Dragado:** El dragado es un método efectivo de restaurar la capacidad de almacenamiento de un embalse. La AAA dragó el Embalse Loíza en 1997-98, aumentando su capacidad de almacenaje en aproximadamente 5.8 millones de metros cúbicos (MM<sup>3</sup>). La AEE ha dragado varios de sus embalses menores, incluyendo los de Viví y Jordán (cuenca superior del Río Grande de Arecibo), y lleva a cabo al momento el dragado parcial del Embalse Coamo. La AAA también dragó en dos ocasiones la laguna de retención en Arecibo que alimenta la Planta de Filtración Santiago Vázquez, que a su vez supe el Superacueducto de la Costa Norte. En las costas de Puerto Rico también se han llevado a cabo innumerables dragados de puertos y marinas, siendo los más importantes los del Puerto de Ponce (Puerto Las Américas) y el de San Juan. El costo y complejidad de los dragados marinos no es comparable con los dragados en embalses, debido a que los sedimentos de dragados costaneros se disponen en fosas marinas en alta mar, lo que no envuelve el costo de terrenos con ese propósito. La Ley Federal de Agua Limpia no permite la descarga de sedimentos de embalses o terrestres al ambiente marino.

Sin embargo el dragado de embalses representa varias desventajas significativas, incluyendo:

1. **Costo Extraordinario:** La única referencia en Puerto Rico que permite evaluar y comparar el costo de un dragado es la del Embalse Loíza.
  - a. El dragado de los embalses Viví y Jordán, así como el de Coamo, no involucraron la remoción y disposición de cantidades significativas de sedimentos. La AEE no ha divulgado el costo actual.
  - b. Los dragados de la laguna del Superacueducto representaron inversiones de \$5 millones en 1998 y de \$1.5 millones en el 2007. En el 2007 se removieron aproximadamente 250,000 M<sup>3</sup>, lo que representó un costo unitario de \$6/M<sup>3</sup>. Sin embargo,

este dragado se llevó a cabo con dragas desde la orilla y no requirió permisos significativos ni costos de disposición extraordinarios, ya que el material fue depositado en las cercanías de la laguna.

- c. El costo de dragar el Embalse Loíza en 1998-99 fue de aproximadamente \$65 millones (incluyendo permisos y consultores), resultando un aumento de capacidad de aproximadamente 5.8 Mm<sup>3</sup>. Parte de este aumento de capacidad fue en el “área muerta” del embalse. Esto es equivalente a un costo de \$11.20/m<sup>3</sup>. Sin embargo, este costo incluyó la adquisición de las parcelas utilizadas para disponer de los sedimentos, por lo que el costo de dragado fue del orden de \$10/m<sup>3</sup>. Al tomar en cuenta la inflación desde la fecha del dragado, el costo actual de dragar cualquier embalse se estima en \$15/m<sup>3</sup>. Este estimado podría variar con la localización del embalse, el potencial de reuso del material, y la disponibilidad de terrenos para almacenar temporera o permanentemente los sedimentos dragados.

2. **Efectividad a Largo Plazo del Dragado:** Las presas son obstrucciones al paso de los ríos, y actúan como barreras hidráulicas que detienen el flujo de sedimentos suspendidos en el agua durante crecientes. El proceso de sedimentación de todos los embalses es continuo, y en zonas tropicales como Puerto Rico, las tasas de sedimentación son extremas debido a la combinación de la geología, las pendientes, los tipos de suelos, y la intensidad de las lluvias. El USGS llevó a cabo en el 2004 un estudio comparativo de las tasas de sedimentación de los embalses en la Isla (Soler, 2004). Los resultados del estudio se resumen en la Tabla 3 siguiente, extraída del informe de Soler. Estos datos documentan que la capacidad de los embalses en la Isla se reduce un promedio de 0.7 % por año, variando desde 0.2 % al 1.7 % anual. Los embalses Loíza y Dos Bocas reflejan tasas elevadas de 1.1 % y 0.9 % anuales. La importancia de

estos datos en relación a los dragados, es que en el caso del Embalse Loíza, cada 10 años pierde el 11 % de su capacidad residual, mientras que Dos Bocas pierde el 9 % de su capacidad en el mismo término. Como se demuestra más adelante para ambos embalses, la pérdida de capacidad indicada se refleja eventualmente en su rendimiento seguro. Durante sequías, esta merma en el rendimiento seguro es crítica para los abastos de agua que reciben las plantas de filtración de la AAA. Esto permite concluir que los dragados son medidas temporeras para aumentar la capacidad de los embalses. La capacidad ganada es rápidamente neutralizada por los sedimentos acarreados por los ríos represados. Durante eventos de lluvia extraordinarios, tales como la vaguada de septiembre 22-24 de 2008, el efecto de pérdida de capacidad se acelera.

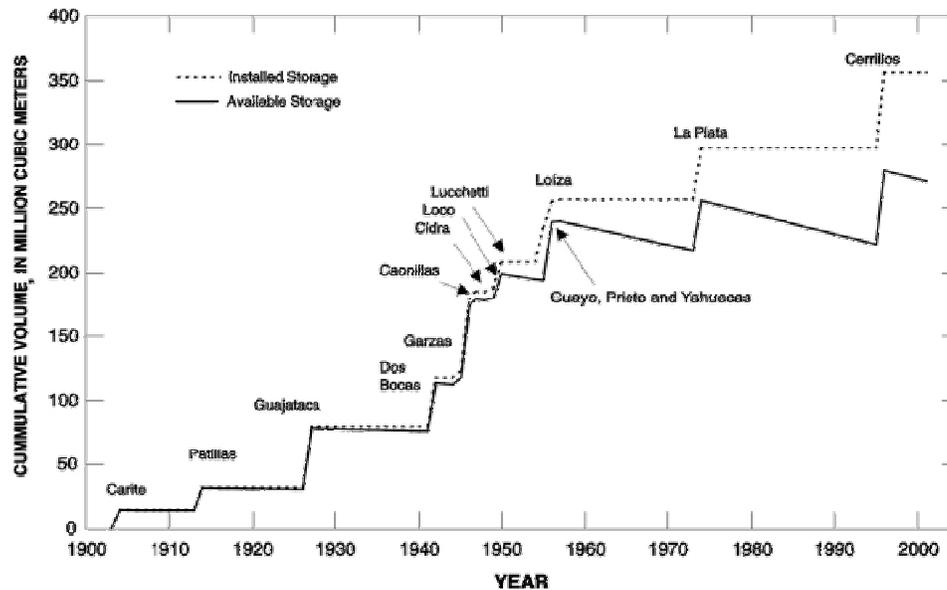
**Tabla 3. Resumen de las tasas de sedimentación de los principales embalses en Puerto Rico (USGS, Soler, 2004).**

Reservoir	Original capacity, in Mm <sup>3</sup>	Drainage area, in km <sup>2</sup>	Year Completed	Age	Storage capacity, in Mm <sup>3</sup>	Total volume loss, Mm <sup>3</sup>	Long-term volume loss, in m <sup>3</sup> /yr	Loss in percent (%)	Long-term storage loss per year, in percent (%)
Caonillas	55.66	126.65	1948	52	42.27	13.39	257,500	24	0.5
Carite	13.95	20.51	1913	86	10.74	3.21	37,326	23	0.3
Cidra	6.54	21.39	1946	51	5.76	0.78	15,294	12	0.2
Dos Bocas	37.5	310	1942	57	18.04	19.46	341,404	52	0.9
Garzas	5.8	15.6	1943	53	5.11	0.69	13,019	12	0.2
Guajataca	48.46	79.77	1928	71	42.28	6.18	87,042	13	0.2
Guayo	19.2	24.86	1956	41	16.57	2.63	64,146	14	0.3
La Plata	40.21	469	1974	24	35.46	4.75	197,917	12	0.5
Loíza	26.81	538	1953	41	14.2	12.61	307,561	47	1.1
Loco	2.4	21.76	1951	49	0.87	1.53	31,224	64	1.3
Lucchetti	20.35	44.81	1952	48	11.88	8.47	176,458	42	0.9
Patillas	17.64	65.27	1914	83	13.84	3.8	102,703	22	0.6
Prieto	0.76	24.8	1955	42	0.22	0.54	12,857	71	1.7
Yahuecas	1.76	45.17	1956	41	0.33	1.43	34,878	81	2
Average							119,952	35	0.7

Fuente: USGS, 2004

El estudio de Soler también provee un cuadro gráfico ilustrativo de la pérdida acumulativa de capacidad de los principales embalses en la Isla desde su construcción hasta el 2004 (Figura 2).

**Figura 1. Pérdida acumulativa de capacidad de los principales embalses en Puerto Rico, 1900-2004 (Soler, USGS, 2004).**



Los datos en la Figura 1 ilustran que la capacidad de los embalses construidos en Puerto Rico en el Siglo 20 se ha reducido en un 25 % (90 MM<sup>3</sup> sedimentados de 360 MM<sup>3</sup> construidos). Más importante aún es la tendencia de aumento en la tasa de pérdidas de capacidad acumulativa, como puede apreciarse de la curva luego de 1955. Esto se debe en parte a que los primeros embalses fueron construidos cuando la población de la Isla era mucho menor y los efectos de erosión de las cuencas menos intensos. A medida que aumentó la necesidad de agua con el aumento de población, los embalses luego de 1955 se construyeron en cuencas mayores y más desarrolladas, donde las tasas de erosión son mayores y el transporte de sedimentos a los ríos y embalses se acelera.

El mejor ejemplo de la ineficiencia de los dragados periódicos es el caso del Embalse Loíza, anteriormente descrito relativo a su costo.

- a. Como se indicara anteriormente, el dragado de Loíza en 1996-98 aumentó su capacidad en  $5.8 \text{ MM}^3$  a un costo de \$65 millones.
- b. El USGS documentó en su estudio de 2004 sobre la sedimentación de Loíza (Soler y Gómez, 2005) que las crecientes causadas por el huracán Georges en 1998, combinado con la tasa anual normal de sedimentación, redujeron la ganancia efectiva a aproximadamente  $3.96 \text{ MM}^3$ .
- c. El estudio de Quiñones (2008) sobre los efectos de la vaguada de septiembre 22-23 de 2008 en el Embalse Loíza establece que los sedimentos acarreados por las crecientes de esos dos días neutralizaron aproximadamente el 24 % de la capacidad original ganada por el dragado, y el 35 % de la capacidad ganada remanente. Las descargas de sedimentos de los ríos Grande de Loíza y Gurabo al Embalse Loíza durante dicha vaguada se resumen en la Figura 2.

**Figura 2. Descarga de sedimentos al Embalse Loíza durante la vaguada de septiembre 22-23 de 2008 (Quiñones, 2008)**



- d. La capacidad remanente ganada por el costoso dragado es ahora de solamente de 2.58 MM<sup>3</sup>, ó el 44% de la capacidad ganada originalmente en 1999.
- e. La AAA se enfrenta a la necesidad de volver a dragar el Embalse Loíza en los próximos 10 años, o antes de ocurrir otro huracán o vaguada que descargue cantidades extraordinarias de sedimentos. De ocurrir una sequía severa en la Región Norte que afecte las cuencas de los embalses Dos Bocas, La Plata y Loíza, la AAA no dispondrá de suficiente agua para suplir la demanda en la ZMSJ, y requerirá reducir el nivel de servicio. Un nuevo dragado que recupere la capacidad de Loíza en 6 MM<sup>3</sup> le costará a la AAA aproximadamente \$90 millones.

**b. Remoción de Sedimentos Durante Crecientes Mayores:** Greg Morris Engineering (GME) ha propuesto en varias ocasiones a la AAA utilizar el flujo y fuerza hidráulica de las crecientes para remover parte de los sedimentos de los embalses (GME, 2009, *Sustainable Management of Reservoir Sedimentation, Loíza Watershed*). Este concepto se basa en los siguientes procedimientos:

1. Proveer información en tiempo real de la lluvia y crecientes en la cuenca alimentada a un modelo hidráulico de flujo y transporte de sedimentos.
2. Programar la operación de las compuertas en la presa de Carraízo (que forma el Embalse Loíza) para coordinar su apertura con el pico del flujo de las crecientes, pero limitando la descarga máxima de agua 60,000 pies cúbicos por segundo (pcs). Esta limitación se debe a que un flujo mayor ocasionaría inundaciones en las zonas bajas de Canóvanas y Loíza aguas abajo de la presa y el embalse.
3. Teóricamente la propuesta se fundamenta en que el flujo de entrada y salida del embalse llegará a un equilibrio (*steady state*), manteniendo una velocidad a través del embalse suficiente para acarrear los sedimentos suspendidos y

suspender en el torrente parte de los sedimentos acumulados en el fondo.

4. En la práctica este procedimiento no se ha probado para condiciones limitantes de la apertura de las compuertas y descarga de agua indicadas. GME se refiere a experimentos en China en dos embalses con características muy diferentes a Loíza. Previo a intentar esta estrategia es necesario investigar los efectos de la sinuosidad y profundidad del embalse en las velocidades del agua desde el remanso hasta la presa durante crecientes de la magnitud propuesta. Esto se puede lograr mediante la calibración de un modelo matemático bi-dimensional del flujo a través del embalse. Existen datos hidrológicos e hidráulicos amplios para llevar a cabo el análisis indicado.
5. Hasta tanto no se verifique mediante un análisis numérico confiable si hidráulicamente este procedimiento resultará en suspender una parte sustancial de los sedimentos acumulados en el fondo del embalse, y acarrearlos por las compuertas fuera del embalse, el mismo no se debe intentar.

**c. Construcción de Barreras Hidráulicas Aguas Arriba de los Embalses para Interceptar los Sedimentos:** La intercepción de los sedimentos aguas arriba de un embalse resultaría en reducir sus tasas de sedimentación y alargar su vida útil. Esta práctica es antigua y se lleva a cabo en las cuencas que nutren cientos de embalses de todos tamaños en E.U. y varios países europeos. El US Forest Service construye en las cuencas que maneja pequeñas represas diseñadas para interceptar los sedimentos acarreados de los bosques hacia las quebradas y ríos.

1. Es posible construir una barrera hidráulica en el canal principal de un río turbulento sin afectar los flujos mínimos ni la emigración aguas arriba de especies acuáticas. La barrera hidráulica reduce la velocidad del agua durante las crecientes, precipitando los sedimentos de mayor tamaño.

Es mucho menos costoso remover sedimentos de un canal de un río que de un embalse. Esto debido a que se puede utilizar equipo motorizado directamente en el cauce (excavadoras y dragas móviles), mientras que el dragado en el embalse requiere equipo especializado montado en una barcaza. Además, la remoción de sedimentos de un río no requiere permisos rigurosos como en el caso del dragado de un embalse.

2. En Puerto Rico no se practican estas estrategias en ninguna de las cuencas que nutren los embalses. Existen varias oportunidades inmediatas para aplicar estos principios y reducir la tasa de sedimentación de los embalses más críticos.
  - a. En el Embalse Dos Bocas, aguas arriba del remanso (“rabo”) existen sinuosidades naturales en el canal del Río Grande de Arecibo que precipitan grandes cantidades de arena y grava en bancos intermitentes. Luego de cada creciente el material es arrastrado aguas abajo hasta descargar finalmente a Dos Bocas. Un análisis llevado a cabo por una empresa privada indica que la tasa de sedimentación de Dos Bocas se reduciría en un 25 % si se extrajeran 80,000 metros cúbicos anualmente de la arena y grava que se deposita en estos bancos de arena. Esta propuesta fue endosada por el DRNA y espera la aprobación de la AEE, que es dueña de los accesos al cauce del río en el tramo propuesto para la extracción de materiales.
  - b. También aguas arriba de Dos Bocas existe una constricción natural donde podría construirse una barrera hidráulica artificial que promueva la precipitación a una zona de detención de la arena y grava durante cada creciente. Luego de cada creciente el material se removería con excavadoras

del área de detención, para ser usados comercialmente.

- c. En el nuevo Embalse Valenciano bajo construcción por la AAA existe una constricción natural aguas arriba del remanso donde podría construirse una barrera hidráulica similar a la descrita para Dos Bocas.
- d. Es necesario evaluar el cauce de los ríos Grande de Loíza y Gurabo aguas arriba del Embalse Loíza para determinar si existen lugares apropiados para la construcción de una barrera hidráulica que reduzca el flujo de sedimentos al embalse. Igualmente, es necesario una evaluación similar aguas arriba del Embalse La Plata.

**d. Dragados de Mantenimiento a Perpetuidad:** El concepto de dragados de mantenimiento a perpetuidad es uno que la AAA tiene que adoptar sin remedio. Esta estrategia es la única que permitirá mantener viables a largo plazo todos los embalses en Puerto Rico como la fuente principal de agua potable. Los embalses suplen aproximadamente el 68 % de toda el agua que utiliza la AAA en sus plantas de filtración. La única alternativa real para sustituir el agua de los embalses son las plantas desalinizadoras. Sin embargo, su costo de desarrollo y operación haría impráctico al momento un programa amplio de plantas desalinizadoras en la Isla. Por otro lado, los acuíferos proveen a la AAA hasta 100 mgd, pero su condición actual de sobre-extracciones, intrusión salina, y contaminación apunta a la necesidad de reducir significativamente en el futuro cercano su utilización. De modo que los embalses seguirán siendo por el futuro previsible el recurso de agua más importante en la Isla. La conservación de su capacidad máxima mediante dragados a perpetuidad es inevitable.

La estrategia propuesta para dragados de mantenimiento a perpetuidad de los embalses en Puerto Rico se fundamenta en

establecer un programa a largo plazo y perenne de dragados. La estrategia propuesta incluye los siguientes elementos:

1. Programar dragar de cada embalse anualmente una cantidad de sedimentos equivalente a por lo menos el promedio anual que se retiene según estimado en los estudios del USGS. De este modo el costo del dragado se distribuye en tiempo permitiendo un programa de gastos (*cash flow*) viable a las agencias responsables del mantenimiento de los embalses. Como se ilustra más adelante, dragar a Dos Bocas del 75 % del material acumulado al 2009 (16 MM<sup>3</sup>) costaría aproximadamente \$250 millones, fondos no disponibles a ninguna de las agencias ni al Gobierno Central. Dragar a Loíza para remover 6 MM<sup>3</sup> costaría por lo menos otros \$90 millones.
2. Iniciar el programa en los embalse más críticos en cuanto a pérdida de capacidad y rendimiento seguro, ya identificados como Loíza y Dos Bocas.
3. Iniciar de inmediato los estudios ambientales para obtener los permisos federales y estatales requeridos para iniciar el dragado de Dos Bocas. Esto urge debido a que tomará por lo menos dos (2) años en completar este proceso. Más adelante en este informe se proveen detalles de los requisitos ambientales del dragado de Dos Bocas.
4. En el caso del Embalse Loíza, solamente es necesario enmendar los permisos emitidos para el dragado de 1997-98, lo cual no debe requerir esfuerzos o costos significativos.
5. Expandir el programa luego de tres años de iniciar el dragado de mantenimiento de Loíza y Dos Bocas a los embalses de La Plata, Caonillas, Patillas, Toa Vaca, Carite, Guayabal, Loco, Lucchetti, y Guajataca, en base a prioridades establecidas por la pérdida de capacidad útil.
6. Desarrollar el programa inicial en Loíza y Dos Bocas en alianza con el sector privado. Esto conllevaría solicitar propuestas privadas para la adquisición de una draga adecuada para la remoción de los sedimentos y su

disposición y reuso según dictado por la composición del material. La cantidad de arena y grava en los sedimentos en los embalses es atractiva para estimular la participación del sector privado con una inversión parcial del Gobierno y las agencias responsables de los embalses. Los ingresos de la venta de materiales prometen reducir los costos de los dragados.

7. Iniciar el programa de barreras hidráulicas como parte de la estrategia de mantenimiento a perpetuidad de los embalses.

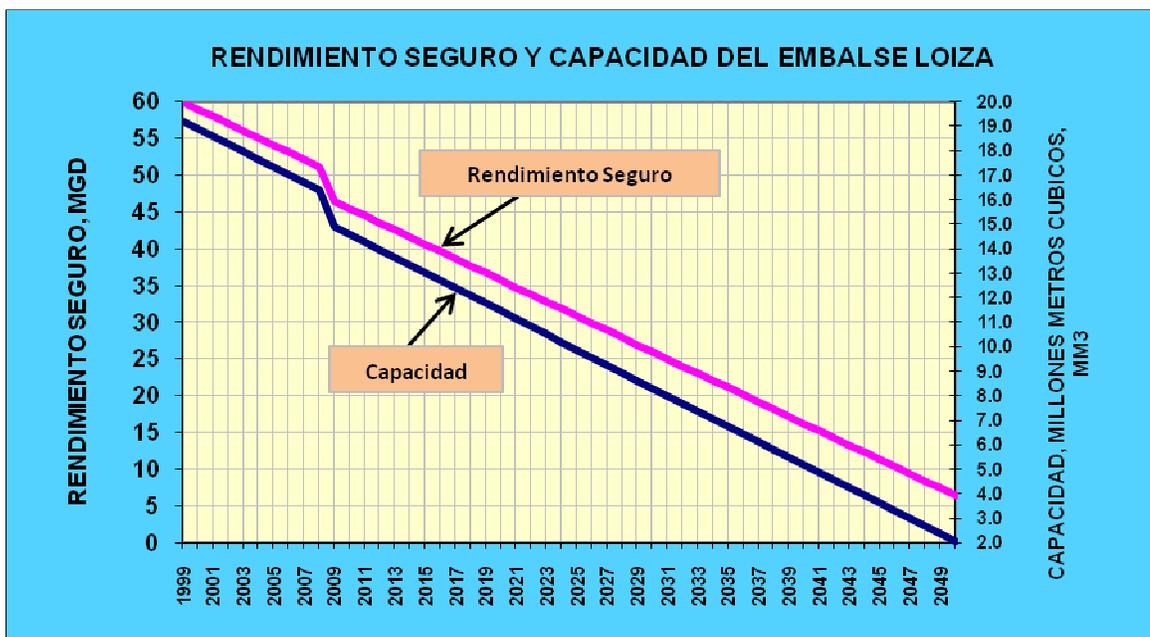
### **3. Detalles de las Estrategias para los Dragados a Perpetuidad de los Embalses Loíza y Dos Bocas.**

Como se indicara en las secciones anteriores, la prioridad inmediata es iniciar sin dilaciones mayores el proceso conducente a los dragados de mantenimiento de Loíza y Dos Bocas. Esto es urgente, pues como repetido en varias instancias, en la eventualidad de una sequía mayor, la pérdida de capacidad y rendimiento seguro de estos dos embalses debido a la acumulación de sedimentos, impactará directamente el servicio de agua potable de la AAA a la ZMSJ.

- a. **Embalse Loíza:** El impacto inmediato de la sedimentación acelerada del Embalse Loíza y su pérdida de capacidad es la merma en su rendimiento seguro (generalmente denominado el Q99). Este valor representa la cantidad de agua que el embalse puede suplir continuamente el 99 % del tiempo antes de que alcance un nivel crítico. El valor del Q99 de un embalse depende de dos factores: su capacidad; y el flujo de entrada al embalse durante las sequías representadas por la frecuencia indicada. En el caso del Embalse Loíza, el impacto futuro de la sedimentación del embalse puede apreciarse en la Figura 3 a continuación. La Figura 3 ilustra relaciones aproximadas lineales entre la capacidad y Q99 contra el tiempo en años. En el mundo real estas correlaciones no son lineales debido a la geometría del embalse. Las conclusiones principales que se derivan de los datos en la Figura 3 incluyen:

1. La capacidad en Loíza a finales del 2008 era de solamente 14.87 MM<sup>3</sup>, reduciéndose en 1.39 MM<sup>3</sup> durante la vaguada de septiembre 22-23 de 2008.
2. La capacidad de Loíza se reducirá a solamente 8 MM<sup>3</sup> para el 2030 de no dragarse el embalse. Paralelamente, el rendimiento seguro durante sequías se reducirá a aproximadamente 26 mgd, limitando los abastos a la ZMSJ.

**Figura 3. Relación de capacidad y rendimiento seguro del Embalse Loíza desde 1999 al 2049.**



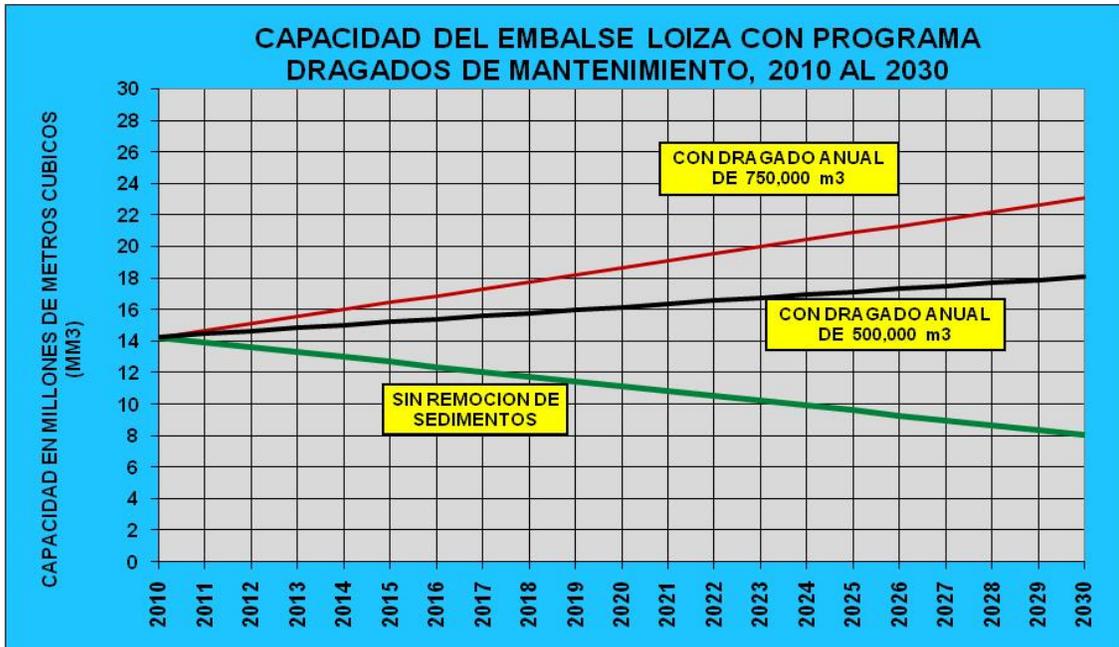
Ante estos estimados de pérdida de capacidad y rendimiento seguro sustanciales en el Embalse Loíza, se propone la siguiente estrategia para la restauración y conservación del embalse.

- a. Emitir una Solicitud de Propuesta (*RFP*) a entidades privadas para el dragado a perpetuidad del embalse. Esto conllevaría dragar un volumen de sedimentos un poco mayor a la descarga promedio anual de sedimentos que recibe el embalse.

1. La Figura 4 Representa una estrategia de dragado de 20 años, que es el término recomendado para la emisión de un contrato de dragado a la empresa seleccionada competitivamente. Se incluyen escenarios sin dragado, y con dragados de 500,000 y 750,000 M<sup>3</sup> por año
2. Como puede apreciarse de esta la Figura 4, el dragado de un promedio anual de 750,000 M<sup>3</sup> resultaría en un aumento paulatino en la capacidad del embalse hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 23 MM<sup>3</sup> en el 2030. Esto representaría un aumento en la vida útil del embalse de 46 años en el 2010 a 74 años en el 2030. Luego del 2030 se revisaría la estrategia de dragado en base a estudios de capacidad remanente por parte del USGS. Como se indicara anteriormente, esta estrategia no toma en cuenta eventos extraordinarios que pudieran requerir dragar cantidades mayores en un año definido.
3. La cantidad total de sedimentos que se dragaría durante los 20 años del plan sería de 15 MM<sup>3</sup>. Es importante determinar si los diques existentes tienen capacidad para almacenar esta cantidad o es necesario modificarlos.
4. El costo anual de dragar 750,000 M<sup>3</sup> se estima en \$11.25 millones, asumiendo un costo de \$15/M<sup>3</sup>. Una vez el RFP se emita y se obtengan propuestas, este valor pudiera ser menor dependiendo del valor comercial del material dragado. En comparación, el dragar hasta 6 MM<sup>3</sup> en un año (lo cual es técnicamente viable) costaría a la AAA hasta \$90 millones sin deducir cualquier valor comercial del material dragado. Aún cuando el

material generara la mitad de la cantidad indicada, el balance de \$45 millones en un año es una suma extraordinaria en el presupuesto de la AAA.

**Figura 4. Escenarios de dragados de mantenimiento continuos en el Embalse Loíza del 2010 al 2030.**



5. El RFP debe incluir una opción para extraer una cantidad mayor de sedimentos al valor de 750,000 M<sup>3</sup> recomendado. Esto es necesario para atender la eventualidad de que un evento extraordinario como la vaguada del 2008 descargue una cantidad extraordinaria de sedimentos al embalse.

b. Completar la evaluación que lleva a cabo CSA sobre la composición del material descargado en los dos diques al sur del embalse luego del dragado en 1997-98. Esto es esencial para estimar la capacidad adicional de almacenaje de los dos diques, así como para evaluar el potencial de elevar el nivel de los diques para almacenar dragados adicionales.

- c. Preparar las enmiendas a los permisos del COE y la JCA para la disposición del dragado futuro en los diques indicados.
  - 1. El permiso del COE debe enmendarse para autorizar descargas de sedimentos dragados de Loíza por tiempo indefinido, como una actividad de mantenimiento del embalse. La Sección 404 de la Ley Federal de Agua Limpia, que provee las guías para los permisos de dragados que emite el COE, autoriza actividades de mantenimiento indefinidas cuando está envuelto el interés público.
  - 2. La DIAF aprobada por la JCA para el dragado de Loíza tiene vigencia indefinida mientras las condiciones ambientales en el embalse no cambien significativamente. Es necesario someter una carta de notificación a la JCA como parte de la obtención de los permisos necesarios para la actividad física de dragado (permisos de ruido; Polvo Fugitivo; CES).
  - 3. Es necesario actualizar el Permiso Federal General para descargas de escorrentías pluviales de los diques al remanso del embalse.
  
- d. Contratar los servicios del Instituto de Investigaciones de Recursos de Agua del Recinto Universitario de Mayagüez para evaluar la viabilidad hidráulica de la alternativa propuesta por GME para inducir descargas de los sedimentos en el embalse durante crecientes.
  - 1. Preparar un RFP para el IIRA-RUM.
  - 2. Una vez concluido el análisis, de ser positivos los resultados, iniciar negociaciones con GME para llevar a cabo una demostración “viva” del

proceso durante la próxima creciente significativa en la cuenca.

3. De ser negativo el resultado del RUM, descartar definitivamente esta estrategia.
- e. Evaluar la viabilidad técnica de instalar barreras hidráulicas aguas arriba del Embalse Loíza en puntos estratégicos en los ríos Grande de Loíza y Gurabo.

**b. Embalse Dos Bocas:** El Embalse Dos Bocas sufre de una de las tasas de sedimentación más altas en Puerto Rico. El USGS ha llevado a cabo siete (7) estudios de la capacidad del embalse desde 1942, el más reciente en el 2005. Los resultados principales de estos estudios se resumen en la siguiente Tabla 5 obtenida del estudio del USGS del 2005 (Soler, 2007).

**Tabla 5. Resumen de los estudios de capacidad del Embalse Dos Bocas llevados a cabo por el USGS.**

Year	1942	<sup>5</sup> 1977	<sup>5</sup> 1985	1994	1997	1999	2005
Reservoir surface area, in square kilometers <sup>1</sup>	2.14	2.14	2.14	1.78	1.78	1.78	1.68
Capacity, in million cubic meters	37.5	27.14	24.2	21.31	20.23	18.04	17.26
Live storage, in million cubic meters	29.47	23.13	---	19.15	18.68	17.06	16.5
Dead storage, in million cubic meters	7.83	4.01	---	2.16	1.55	0.98	0.76
Years since construction	0	35	43	52	55	57	63
Sediment accumulated, in million cubic meters	---	10.36	13.3	16.19	17.27	19.46	20.24
Inter-survey sediment accumulation, in million cubic meters	---	10.36	2.94	2.89	1.08	2.19	0.78
Long-term storage loss, in percent	---	27.6	35.5	43.2	46	52	54
Annual loss of capacity, in percent	---	0.79	0.82	0.83	0.84	0.91	0.86
Long-term annual loss of capacity, in million cubic meters	---	0.296	0.309	0.311	0.314	0.341	0.321
Inter-survey loss of capacity, in million cubic meters per year	---	0.296	0.368	0.321	0.367	1.09	0.13
Sediment trapping efficiency, in percent <sup>2</sup>	86	83	83	78	78	75	73
Long-term sediment yield, in cubic meters per square kilometer per year <sup>3</sup>	---	1,137	1,188	1,225	1,235	1,377	1,312
Inter-survey sediment yield, in cubic meters per square kilometer per year <sup>4</sup>	---	1,137	1,428	1,295	1,489	4,648	567
Year the reservoir would fill with sediments	---	2069	2063	2062	2061	2052	2059

<sup>1</sup> Calculated using the Geographic Information System (GIS).

<sup>2</sup> Estimated based on the relation between storage capacity and water inflow volume established by Brune (1953).

<sup>3</sup> Adjusted by the average long-term trapping efficiency until the survey's year.

<sup>4</sup> Adjusted by the average trapping efficiency between surveys.

<sup>5</sup> U.S. Geological Survey, unpublished data, 1977.

<sup>6</sup> Quiñones and others, 1989.

1. Esta tabla incluye varios datos importantes sobre Dos Bocas que nos permiten estimar su capacidad actual y la tendencia futura de sedimentación:
  - a. La capacidad en el 2005 era de 17.26 MM<sup>3</sup>.
  - b. La tasa de sedimentación anual promedio es de 0.32 MM<sup>3</sup>.
  - c. Proyectando la capacidad al 2010 (cuando podría comenzar el dragado) con la tasa anual de sedimentación resulta en una capacidad de 15.66 MM<sup>3</sup>.
  
2. La estrategia propuesta para aumentar la capacidad del Embalse Dos Bocas incluye tres elementos detallados a continuación.
  - a. Iniciar de inmediato los estudios ambientales y la preparación de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) para el dragado de mantenimiento a perpetuidad de Dos Bocas.
  - b. Este proceso tomará dos años hasta obtener los permisos federales y estatales necesarios para iniciar el dragado.
  - c. Clave en el proceso ambiental y costo del dragado es ubicar terrenos favorables para almacenar o disponer en forma final de los sedimentos a dragarse. Existen varias alternativas de terrenos potenciales que necesitan evaluarse en detalle como parte de la DIA y los permisos necesarios para el proyecto.
    1. Aguas abajo de Caonillas, en un predio cercano al ramal este de Dos Bocas.
    2. En terrenos cercanos a la laguna de detención del Superacueducto, donde podría construirse un dique para almacenar y decantar los sedimentos. Esta alternativa presenta la complejidad de transportar los sedimentos desde las zonas de dragado aguas abajo

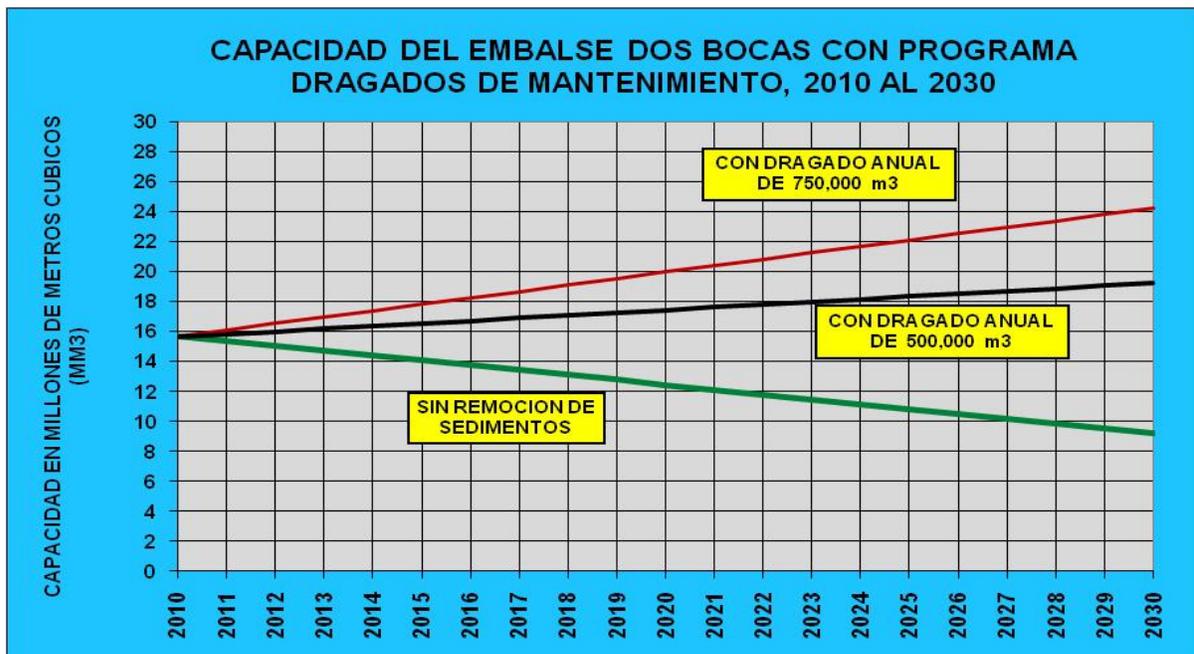
hasta las inmediaciones de la laguna del Superacueducto. Esto aumentaría el costo del dragado pero pudiera resultar en economías en la adquisición de los terrenos ya que estos son públicos y parte pertenecen a la AAA.

3. Aguas arriba de Dos Bocas o el Embalse Caonillas, en lugares no definidos preliminarmente.

3. Una vez el proceso ambiental se encuentre avanzado (en aproximadamente un (1) año), preparar y emitir una Solicitud de Propuesta (*RFP*) a entidades privadas para el dragado a perpetuidad del embalse. Esto conllevaría dragar un volumen de sedimentos un poco mayor a la descarga promedio anual de sedimentos que recibe el embalse.

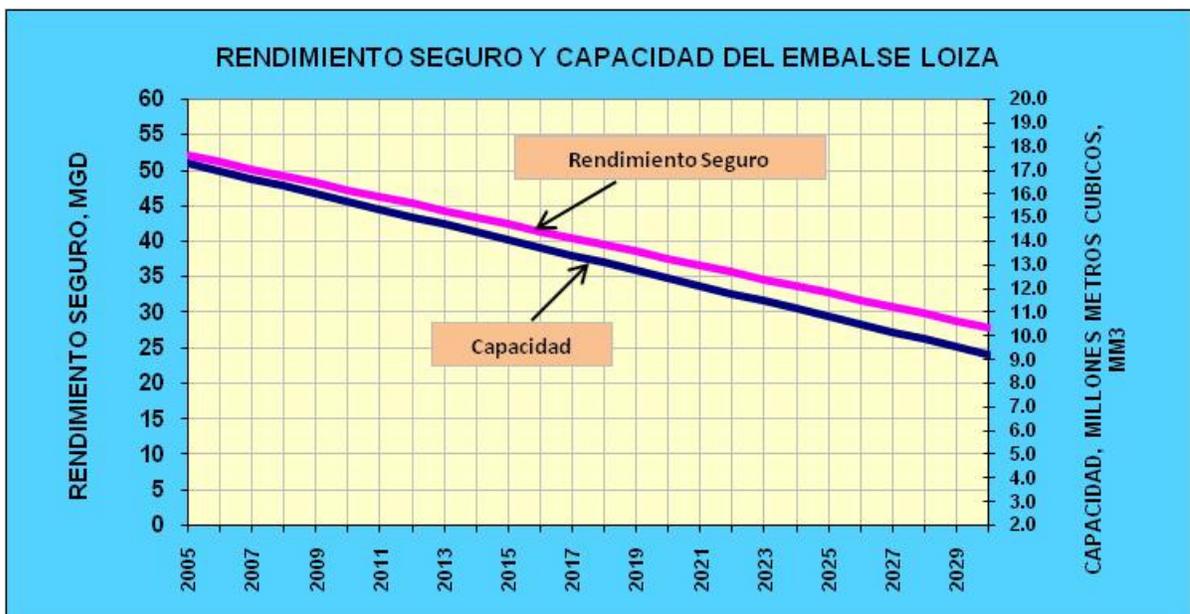
a. Una estrategia de dragado de 20 años se ilustra en la Figura 5, que es el término recomendado para la emisión de un contrato de dragado a la empresa seleccionada competitivamente. Se incluyen escenarios sin dragado, y con dragados de 500,000 y 750,000 M3 por año

**Figura 5. Escenarios potenciales para dragado del Embalse Dos Bocas del 2010 al 2020**



- b. Como puede apreciarse de esta la Figura 5, de no llevarse a cabo dragado alguno en Dos Bocas, su capacidad continuará declinando hasta reducirse a aproximadamente 9.2 MM<sup>3</sup> en el 2030. Esto a su vez tendría un efecto significativo en el rendimiento seguro de Dos Bocas, particularmente durante épocas de sequía.
- c. La Figura 6 ilustra una relación lineal aproximada de capacidad del sistema de Dos Bocas a rendimiento seguro sin dragar el embalse. Las líneas de capacidad y rendimiento seguro declinan con el tiempo a medida que los sedimentos llenan el embalse. La línea de rendimientos seguro representa el peor escenario, proyectando que para el 2030 Dos Bocas tendría una capacidad de producir solamente 10 mgd durante una sequía con intervalo de recurrencia de 100 años (sin incluir las contribuciones de Caonillas). En el 2030, de no dragarse Dos Bocas, su capacidad se reduciría a solamente 9 MM<sup>3</sup>, menos de la mitad de la actual de 16 MM<sup>3</sup>.

**Figura 6. Relación entre la capacidad del Embalse Dos Bocas y su rendimiento seguro (en base a datos del USGS, 2004).**



- d. Por otro lado, la Figura 4 ilustra que el dragado de un promedio anual de 750,000 M<sup>3</sup> resultaría en un aumento paulatino en la capacidad del embalse hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 24 MM<sup>3</sup> en el 2030. Esto representaría un aumento en la vida útil del embalse de 46 años en el 2010 a 76 años en el 2030. Luego del 2030 se revisaría la estrategia de dragado en base a estudios de capacidad remanente por parte del USGS. Como se indicara anteriormente, esta estrategia no toma en cuenta eventos extraordinarios que pudieran requerir dragar cantidades mayores en un año definido.
- e. La cantidad total de sedimentos que se dragaría durante los 20 años del plan sería de 15 MM<sup>3</sup>. Es importante al identificar las áreas para almacenar el material que tengan una capacidad amplia para dragados futuros. modificarlos.
- f. El costo anual de dragar 750,000 M<sup>3</sup> se estima en \$11.25 millones, asumiendo un costo de \$15/M<sup>3</sup>. Una vez el RFP se emita y se obtengan propuestas, este valor pudiera ser menor al tomarse en cuenta el valor comercial del material a dragarse. Aunque al igual que en el Embalse Loíza el dragar hasta 15 MM<sup>3</sup> en un año es técnicamente viable, el costo bruto de esta acción sería de \$225 millones, esto sin considerar el valor comercial del material. Aún cuando se redujera este costo a la mitad por el valor comercial de la grava y arena dragada, la suma es extraordinaria en el presupuesto de la AAA.