



## Proyecto del Tercer Juego de Esclusas

Traducción

**Nombre del estudio en inglés:** Saltwater intrusion analysis for Post Panamax Locks - Study, modeling and analysis of salt water intrusion mitigation systems for revised 3-lift lock configurations

**Nombre del estudio en español:** Análisis de la intromisión de agua salada en esclusas Pospanamax - Estudio, modelo y análisis de sistemas de mitigación para la intromisión de agua salada en nuevas configuraciones de esclusas de 3 niveles

**Fecha del informe final:** Abril de 2005

**Fecha de la traducción:** 17 de mayo de 2006

**Nombre del consultor:** WL Delft Hydraulics

## RESUMEN EJECUTIVO

### 1 Introducción

La Autoridad del Canal de Panamá (ACP) adjudicó a WL | Delft Hydraulics el contrato para el estudio, modelo numérico y análisis de los sistemas de mitigación de la intromisión del agua salada, dirigidos a reducir la intromisión del agua salada en el Lago Gatún y el Corte Gaillard a través de las futuras esclusas Pospanamax (contrato No. SAA-135358, del 30 de junio de 2004). Los resultados de los estudios anteriores que WL | Delft Hydraulics llevó a cabo (contrato SAA-74337 y contrato SAA-110830) constituyen un punto de partida para el presente estudio, aunque este se concentra en un diseño *revisado* de un *sistema de esclusas de tres escalones o niveles*. Las dimensiones escogidas para las esclusas Pospanamax propuestas son: longitud nominal de 457.32 metros (1500 pies), ancho de 54.86 metros (180 pies) y profundidad de 16.76 metros (55 pies). Estas medidas son significativamente mayores que las dimensiones de las esclusas de tamaño Panamax existentes y que miden 33.5 metros de ancho por 305 metros de



longitud por 13 metros de profundidad. La ACP ha escogido las dimensiones nominales de un buque Pospanamax como: longitud de 385.7 metros (1265 pies), ancho de 45.72 metros (150 pies) y calado de 15.24 metros (50 pies en agua dulce tropical). Con el propósito de realizar una simulación numérica de la intromisión del agua salada, se ha ampliado el modelo SWINLOCKS existente. Este modelo de simulación fue desarrollado previamente por WL | Delft Hydraulics bajo los contratos SAA-74337 y SAA-110830.

Los objetivos de los presentes servicios incluyen:

- Análisis de las opciones de sistemas de mitigación; este análisis se apoya en estudios de casos de sistemas de mitigación de la intromisión del agua salada que se utilizan en Holanda (contribución del Ministerio de Obras Públicas)
- Modelaje de sistemas selectos de mitigación en el modelo SWINLOCKS existente
- Modelaje del sistema de esclusas Pospanamax en el modelo SWINLOCKS existente con las dimensiones revisadas de las cámaras de las esclusas (esclusas de 3 niveles con 2 tinas de reutilización de agua por nivel y esclusas de 3 niveles con 3 tinas de reutilización de agua por nivel)
- Simulación y análisis de la intromisión de agua salada para sistemas selectos de mitigación para dos configuraciones de esclusas Pospanamax propuestas (esclusas de 3 niveles con 2 tinas de reutilización de agua por nivel y esclusas de 3 niveles con 3 tinas de reutilización de agua por nivel) y para condiciones hidráulicas selectas, intensidades del tráfico de buques y escenarios de control de agua; comparación mutua de los sistemas y análisis y conclusiones
- Explicación sobre cómo pueden utilizarse los resultados de las simulaciones en estudios posteriores de la calidad del agua y dispersión de la sal.

## 2 Opciones de sistemas de mitigación

En el anterior Informe “E” (WL | Delft Hydraulics de abril 2004) discutimos varias medidas para mitigar la intromisión de agua salada. La mayoría de estas medidas o sistemas se han aplicado en esclusas y/o probado en condiciones de laboratorio. En la práctica parece que la mitigación de la intromisión del agua salada es asunto delicado. Los efectos de las medidas dependen mucho de una operación cuidadosa de las esclusas, las condiciones hidráulicas que prevalecen, las intensidades del tráfico, etc.

Las condiciones hidráulicas en el Canal de Panamá son favorables en el sentido de que el nivel de agua dulce del Canal es siempre mucho mayor que el nivel de agua salada en el mar, que es lo contrario que existe, por ejemplo, en las esclusas situadas en las áreas de los deltas en los Países Bajos, donde el nivel del mar puede ser mayor y menor que el nivel del agua el canal. Los sistemas de mitigación existentes que han probado ser

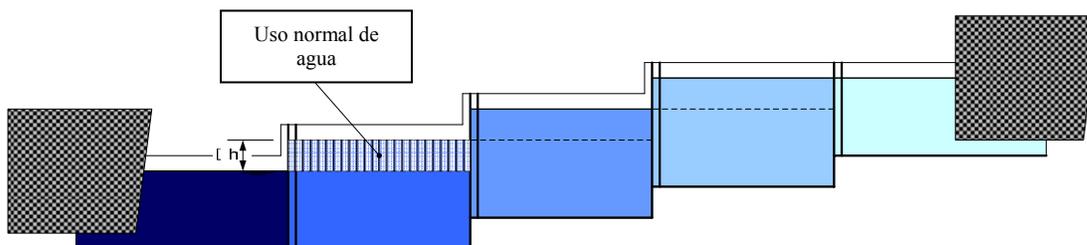


eficaces no pueden ser aplicados de manera sencilla a las esclusas Pospanamax. Han sido diseñados para esclusas de un solo nivel con diferencias de niveles de agua entre la poscámara del lado del mar y la antecámara del lado del lago hasta alrededor de 4 metros, que es considerablemente menos que la elevación de aproximadamente 26 metros del Canal de Panamá. Por consiguiente, las velocidades del flujo en estas cámaras de las esclusas también son generalmente menores que en las esclusas del Canal de Panamá. Las velocidades de flujos mayores causan una turbulencia más fuerte y generalmente también una mezcla más intensa de agua salada y agua dulce, lo que no es favorable para la mitigación de la intromisión del agua salada.

En la fase inicial presentamos diferentes sistemas de mitigación que son adecuados para su aplicación en las esclusas Pospanamax. Al consultar con la ACP, se escogieron seis de estos sistemas de mitigación para una mayor evaluación. Después se ha añadido la opción de la desalinización del agua salada que se introduce. Para la evaluación se utilizó la experiencia con los sistemas de las esclusas que existen en Holanda. Esta evaluación concluyó con una comparación mutua de los sistemas de mitigación; los siguientes factores formaron parte de la evaluación:

1. La efectividad estimada
2. La utilización total de agua para cada esclusaje
3. La demora en el tránsito de buques
4. Los obstáculos para la navegación
5. La complejidad del sistema y la facilidad de su operación
6. El costo de su construcción

La utilización de agua en las esclusas y los sistemas de mitigación se expresan generalmente en este estudio en términos de un uso “normal” de agua. El uso “normal” de agua se define como el producto de  $\Delta h$  (véase la siguiente figura), y el área de la cámara de la esclusa (incluyendo los dos nichos de las compuertas). El valor de  $\Delta h$  es una tercera parte de la diferencia en el nivel de agua entre el Lago Gatún y los océanos, cuya diferencia tiene un valor promedio de 25.7 metros.





La evaluación de los sistemas de mitigación revelaron lo siguiente (véase también la tabla siguiente):

- Sistema 1, *el lavado por escalón de todas las cámaras de las esclusas (esclusaje simulado)*, es el sistema más barato (sin costo adicional), tiene una buena efectividad que corresponde a un uso adicional de agua moderado. Se espera una demora en el tránsito en el caso de una operación de relevo.
- Sistema 2, *el lavado de la esclusa central y la esclusa superior* tiene una efectividad mayor con una pérdida similar de agua. Se espera una demora en el tránsito en caso de una operación de relevo. Hay que prestar atención al cierre de las válvulas de las alcantarillas con flujo de agua. Habrá que incurrir en gastos adicionales de construcción.
- Sistema 4, *el lavado mejorado de las cámaras superior e inferior de las esclusas*, que es el más eficaz, pero la utilización de agua es la mayor de los sistemas. Se espera una demora en el tránsito en caso de una operación de relevo. En vista de la acumulación negativa del agua a través de las compuertas, se requieren compuertas rodantes que cierren en ambas direcciones. También hay que prestar atención al cierre de las válvulas en las alcantarillas con flujo de agua. Habrá que incurrir en gastos adicionales de construcción.
- Sistema 6, *el intercambio de agua salada con agua dulce en la cámara inferior de la esclusa*, es un sistema complejo que debe ser operado con cuidado (es inevitable una demora en el tránsito). La efectividad es grande, pero se logra a expensas de un costo relativamente alto en el uso adicional de agua. Este uso adicional de agua puede evitarse cuando se aplican las tinas de reutilización de agua, aunque ello reducirá la efectividad hasta cierto punto. El buque podría experimentar fuerzas transversales en la cámara inferior de la esclusa. Es el sistema más costoso.
- Sistema 9, *capturar el agua salada en un pozo profundo y drenar el agua salada sacándola por la poscámara de la esclusa*, ofrece una gran efectividad con una utilización moderada de agua adicional. El drenaje de agua salada no causa demoras ni obstaculiza el tránsito. Debido a que el agua salada en el pozo no se posa inmediatamente después del influjo, puede necesitarse un sistema de monitoreo de la concentración de sal para optimizar el programa de drenaje. También puede requerirse un monitoreo regular en vista de la sedimentación del pozo. La construcción del pozo profundo con un sistema de drenaje es cara.
- Sistema 10, *una barrera neumática*, tiene una efectividad baja, pero no requiere utilización de agua adicional. Puede aplicarse con éxito sólo cuando se abran brevemente las compuertas de la poscámara de las esclusas hasta el área de la antecámara. El sistema es barato, pero el costo de operación (la energía que requiere para operar los compresores de aire) puede ser alto.
- La opción de la *desalinización del agua salada que se introduce* tiene una gran efectividad con poca utilización de agua adicional. El costo de la construcción y los costos de operación son extremadamente altos comparados con los demás sistemas.



Aspecto	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4	Sistema 5	Sistema 6	Sistema 7
Límite superior de efectividad (% de reducción de la carga de sal)	72	86	94	85	85	20	90
La pérdida correspondiente de agua, sin la operación de las tinajas de reutilización de agua (como el % del uso normal de agua)	150	150	200	180	162	100	120
Demora en el tránsito	Sí, en caso de una operación de relevo	Sí, en caso de una operación de relevo	Sí, en caso de una operación de relevo	Sí	No	No	No
Obstaculiza el tránsito	Un poco	Un poco	Un poco	Posibles fuerzas transversales sobre el buque	No	Un poco en el caso de los yates	No
Complejidad del sistema, facilidad de operación, puntos de atención	Sencillo	No es complejo; cierre de las válvulas cuando hay flujo de agua	No es complejo; acumulación negativa de agua sobre las compuertas, cierre de las válvulas	No es complejo; requiere operación cuidadosa	No es complejo; posiblemente hay sedimentación del pozo	Sencillo	No es complejo
Amplificador del costo	100	1.05	1.10	1.48	1.40	1.02 ¡Costo de operación!	>10?? También hay un alto costo de energía

Nota: El sistema de mitigación se activa después de cada esclusaje de un buque aguas abajo.

La demora en el tránsito que causa la operación de un sistema de mitigación es particularmente importante, ya que las demoras pueden afectar la capacidad del nuevo carril de tránsito. Lo más probable es que a los buques Pospanamax no se les permita pasar por el Canal de noche, lo que significa que el período de luz de día debe utilizarse para el manejo de buques. Por lo tanto, la capacidad del nuevo carril se ve limitada por el tiempo de luz de día, pero también depende de la hora de operación de las esclusas y de la manera en que se posicionan los buques. En el esclusaje de relevo, las locomotoras guían el buque hasta la mitad y luego regresan a su posición original. Otras locomotoras toman al buque y lo guían el resto de su travesía por las esclusas. Este modo de relevo se ha desarrollado para las esclusas existentes con un sistema de locomotora en un solo carril, y tiene la ventaja de que se puede atender un segundo buque antes de que el primer buque abandone la última cámara del sistema de 3 niveles. Se puede obtener un efecto



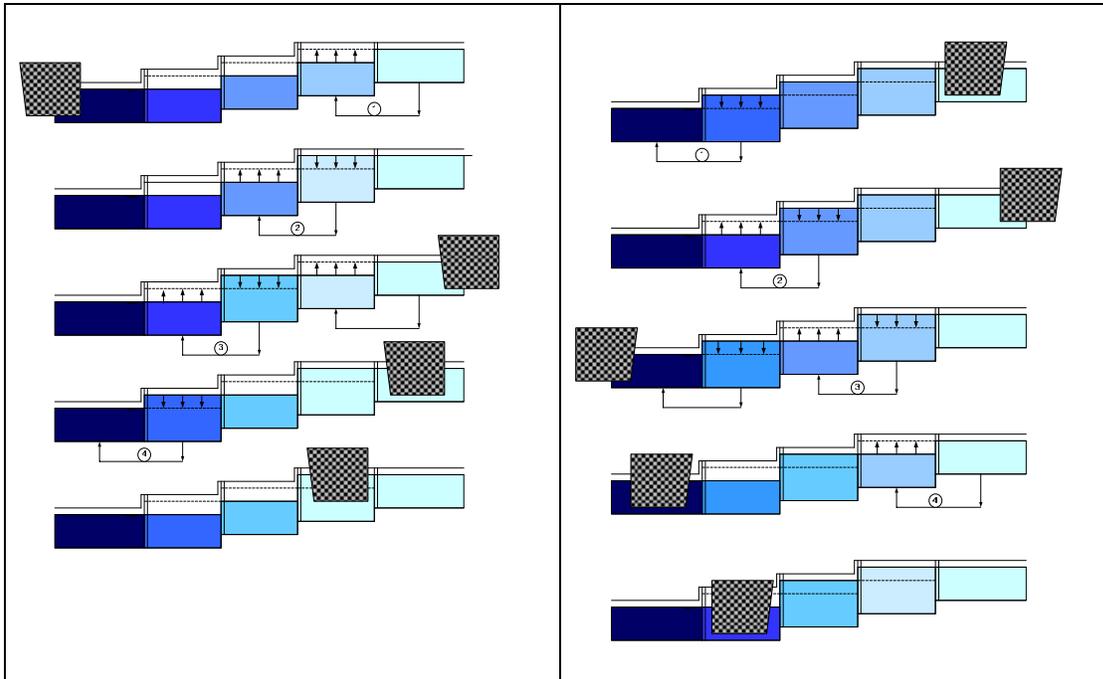
similar de reutilización de tiempo en las nuevas esclusas cuando los remolcadores ayuden a los buques Pospanamax en su tránsito completo por las esclusas.

La capacidad de las esclusas se afecta cuando la operación de un sistema de mitigación requiere de tiempo adicional entre los dos esclusajes subsiguientes, en particular cuando se realiza un esclusaje de relevo o algo similar. Entonces puede reducirse la cantidad máxima de buques Pospanamax que se puede atender por día.

Después de darle una consideración cuidadosa en la reunión con la ACP el 12 de octubre de 2004, se han escogido los siguientes cuatro sistemas de mitigación para analizarlos en mayor detalle, utilizando el modelo de simulación SWINLOCKS:



**Sistema de mitigación I:**  
**El lavado por nivel de todas las cámaras de la esclusa ('esclusaje simulado')**



Sistema I Izquierda: Esclusaje aguas abajo

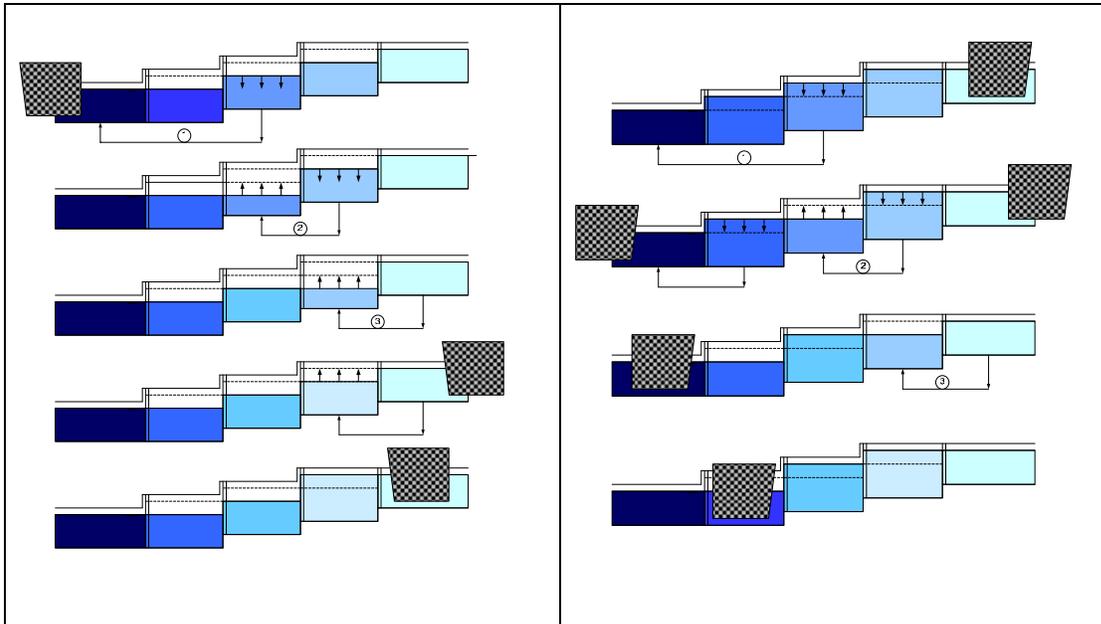
Derecha: Esclusaje aguas arriba

**Características:**

- No se requieren disposiciones especiales; es una operación regular entre dos esclusajes.



## Sistema de mitigación II: Lavado de las cámaras central y superior de la esclusa



Sistema II Izquierda: esclusaje aguas abajo

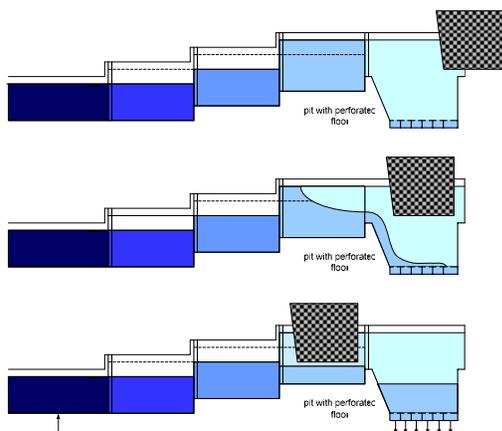
Derecha: Esclusaje aguas arriba

### Características:

- Se requieren alcantarillas separadas con válvulas de control entre la cámara central y la poscámara.
- En un esclusaje aguas arriba: Las válvulas de las alcantarillas tienen que cerrarse cuando el agua de la cámara media está en el nivel bajo predefinido, lo que significa que las válvulas están cerradas cuando los ductos están funcionando a plena capacidad.



### Sistema de mitigación III: Lavado del agua salada de un pozo con piso perforado



Sistema III: Esclusaje aguas abajo

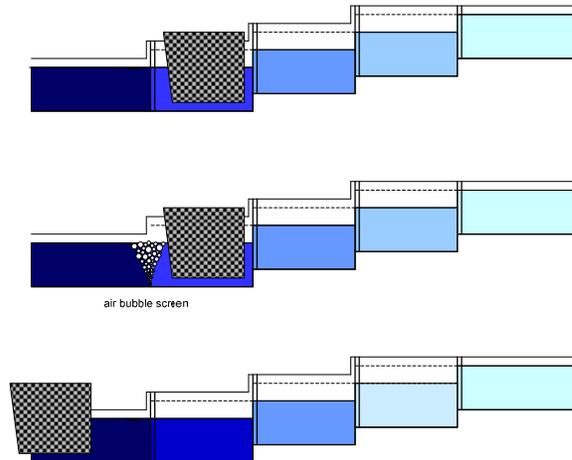
#### Características:

Requiere un pozo que recoja la sal en el lado aguas arriba de la cámara superior, con suelo perforado y un sistema de drenaje; requiere alcantarillas separadas y válvulas de control en la poscámara de la esclusa.



### Sistema de mitigación IV:

#### Barrera neumática en la entrada de las cámaras inferior y superior de las esclusas



Sistema IV: Esclusaje aguas abajo

#### Características:

- Requiere una barrera de burbujas de aire en la entrada hacia la cámara baja y alternativamente, hacia la cámara superior de la esclusa (se necesitan compresores de aire)
- El intercambio de agua que causa el buque no se evita con las barreras neumáticas.

Los sistemas de mitigación I y II tienen en común el hecho de que causan una demora en el tránsito cuando hay un esclusaje de relevo o una operación similar para ahorrar tiempo. Los sistemas III y IV no causan demoras. Los sistemas de mitigación I y IV han sido pasados por el modelo SWINLOCKS de simulación de la intromisión de agua salada.



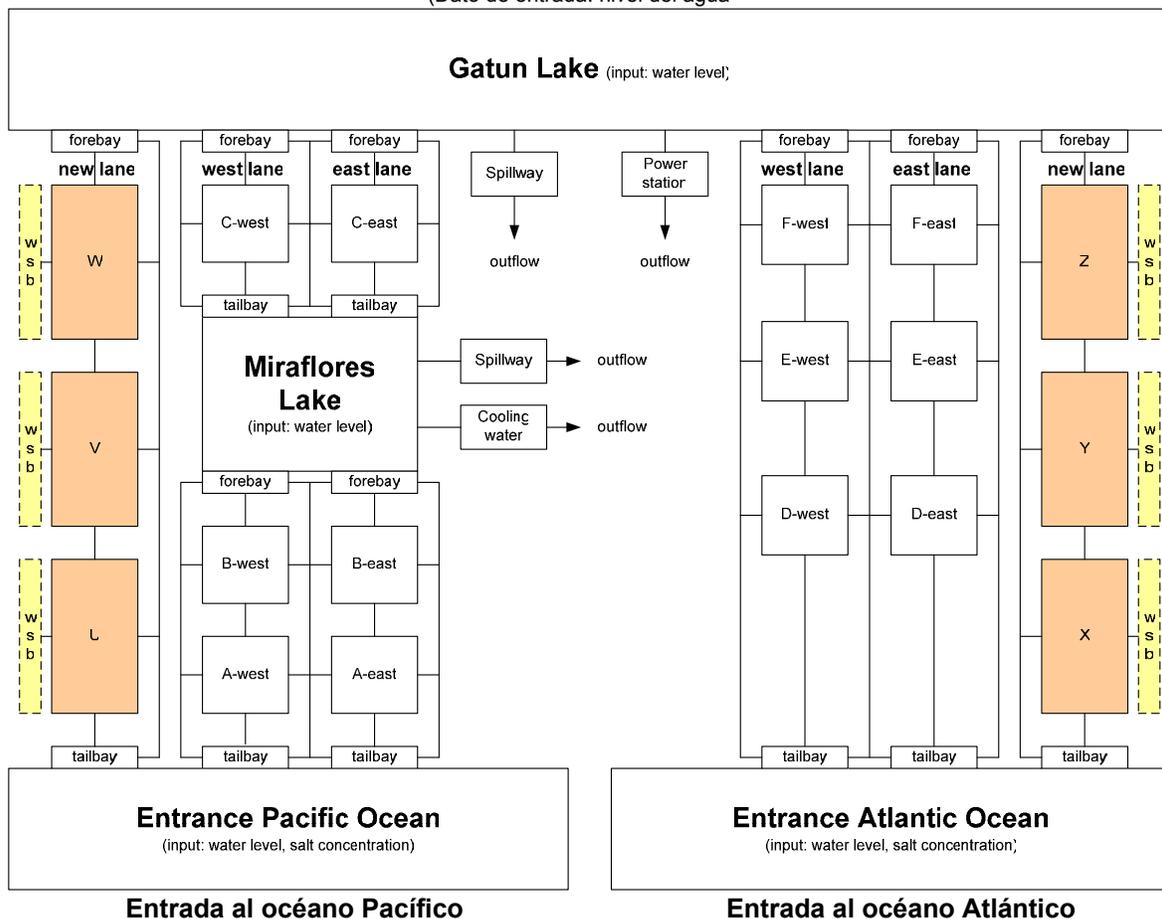
### 3 Extensión del modelo de simulación SWINLOCKS

El modelo de simulación numérica SWINLOCKS de intromisión de agua salada (desarrollado por WL | Delft Hydraulics conforme a los contratos Nos. SAA-74337 y SAA-110830 con la ACP) se utilizó para estudiar la efectividad de los cuatro sistemas de mitigación. Para una descripción completa del modelo existente, consulte nuestros informes anteriores (Informes del A al D, véase la Sección 1.3).

En pocas palabras, el modelo de simulación consta de un número de cuerpos de agua separados que representan las varias cámaras, antecámaras y poscámaras y lagos del sistema del Canal de Panamá, y cada cuerpo de agua tiene un cierto nivel de agua, volumen de agua y concentración salina, ya que están conectados (véase el siguiente esquema, que es válido para la situación futura con esclusas Pospanamax de tres niveles). Un buque que navega de un océano a otro pasará por los diversos cuerpos de agua, transportando un volumen neto de agua desde los lagos hasta los océanos, y una migración de agua salada de un cuerpo de agua al otro.

#### Lago Gatún

(Dato de entrada: nivel del agua)





(Datos de entrada: nivel del agua, concentración de la sal)

(Datos de entrada: nivel del agua, concentración de la sal)

***Nota del traductor:*** En el diagrama, la dirección (este u oeste) que se indica en el dibujo de la Entrada al océano Atlántico para la señalar la ubicación de las esclusas está equivocada, ya que las designaciones de dicha dirección están invertidas.

El agua del Lago Gatún y del Lago Miraflores baja por los niveles durante los esclusajes aguas arriba y aguas abajo de los buques, mezclándose con el agua de las cámaras inferiores durante su llenado. Cuando están en uso las tinas de reutilización de agua, el agua de la cámara de la esclusa se almacena temporalmente durante la nivelación aguas abajo (conjuntamente con una parte del agua salada de la cámara de la esclusa) y se devuelve a la cámara de la esclusa al nivelarse hacia arriba. Cuando las compuertas de las esclusas se abren y un buque sale o entra, el volumen del buque se intercambia y ocurren flujos de densidad entre los cuerpos de agua con densidades diferentes. El modelo de simulación SWINLOCKS computa el transporte del agua y la migración de sal entre los diversos cuerpos de agua de manera esquemática, utilizando como variables base el volumen de agua y la concentración de la sal promediada por volumen en los cuerpos de agua. En un análisis del balance del agua y del balance de la sal, se evalúan los cambios después de cada paso del proceso de un esclusaje aguas arriba o aguas abajo.

Para el *balance de la sal* de los lagos comenzamos con lo siguiente:

El agua de sal se introduce en los lagos a través de las esclusas existentes y futuras. Todas las demás fuentes de agua (el Lago Alhajuela, el río Chagres, las quebradas y los ríos, la precipitación pluvial y la humedad del suelo) abastecen de agua dulce a los lagos. El flujo de agua salada se da a través de los vertederos del lago Gatún (el derrame del agua excedente, el agua para la generación de energía eléctrica) y el lago Miraflores (los derrames del agua excedente, el agua de enfriamiento de la planta térmica). El que ocurre por otros medios (para el agua potable, las aguas de uso industrial, el flujo del agua freática, la evaporación) es imperceptible o puede descartarse para el análisis. Es por esa razón que dichos medios no se modelan separadamente en el modelo SWINLOCKS: el efecto del influjo y del aflujo de agua dulce en el volumen de los lagos se incluye en los niveles del agua de los lagos, que se prescriben como una función de tiempo. El efecto de un cambio en el volumen del agua de los lagos en la concentración de sal se toma en cuenta en el análisis del balance de la sal.

La ACP ha reconsiderado las medidas nominales de los buques Pospanamax [(escogió una manga menor de 45.72 metros (150 pies) en lugar de los anteriores 54.86 metros (180 pies)], y de conformidad con las mismas, también ha reconsiderado las medidas nominales de las esclusas, reduciéndolas. Por lo tanto hubo que extender también el modelo de simulación con un sistema de esclusas de tres niveles con tamaños de las cámaras que son menores que los tamaños de las cámaras utilizados en las simulaciones anteriores. Se han modelado dos opciones para las tinas de reutilización de agua:

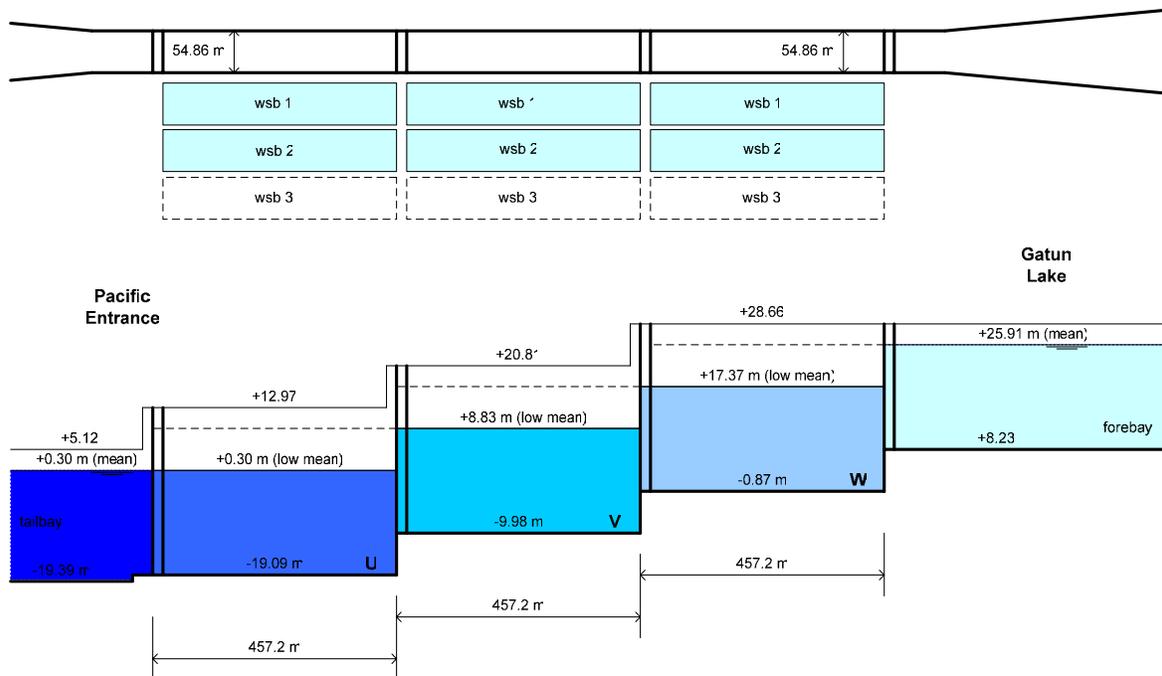
- **Configuración E:** esclusas modificadas de 3 niveles con 2 tinas de reutilización de agua por nivel (las tinas pueden desactivarse), con una longitud nominal de



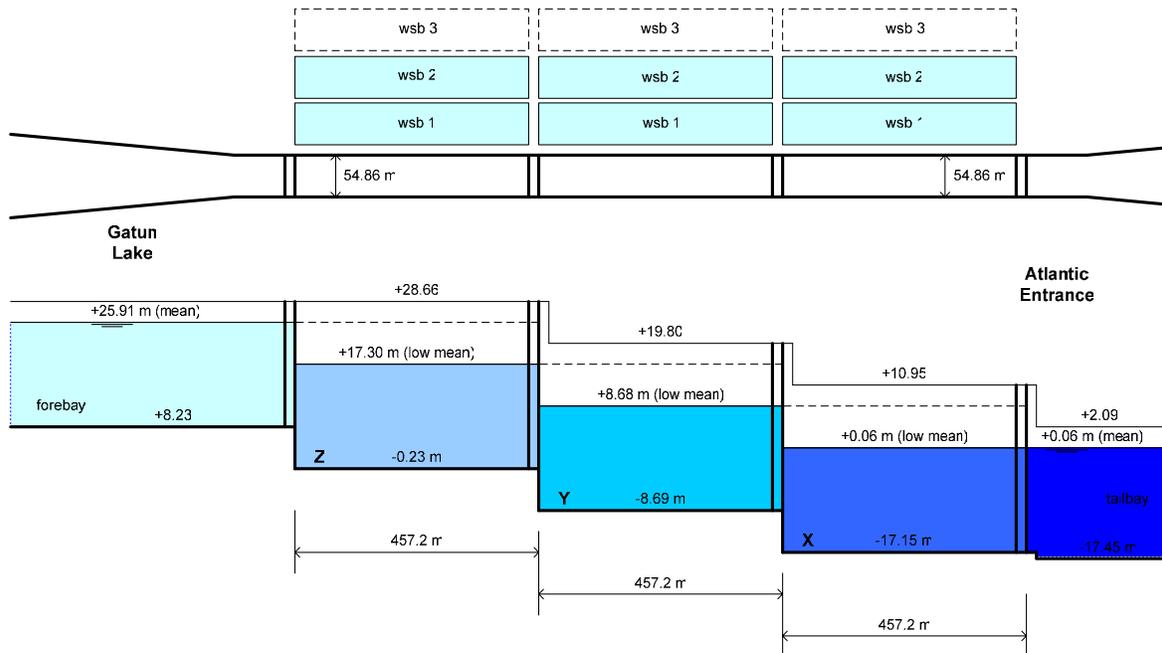
- 457.2 metros, un ancho de 54.86 metros, una profundidad sobre el quicio de 16.76 metros (1,500 pies x 180 pies x 55 pies), espacio bajo la quilla de 1.52 metros (5.0 pies)
- **Configuración F:** esclusas modificadas de 3 niveles con tinas de reutilización de agua por nivel (las tinas pueden desactivarse); una longitud nominal de 457.2 metros, un ancho de 54.86 metros, profundidad sobre el quicio de 16.76 metros (1500 pies x 180 pies x 55 pies), espacio bajo la quilla de 1.52 metros (5.0 pies).

La ACP estableció un espacio bajo la quilla de 1.52 metros (5 pies) para el presente estudio como valor preferido, pero es aparente con base en otros estudios que un espacio bajo la quilla de 1.52 metros no es suficientemente seguro para la navegación. En dicho caso, puede escogerse un espacio bajo la quilla de 3.05 metros (10 pies), lo que dará una profundidad sobre el quicio de 18.3 metros (60 pies).

Las siguientes figuras presentan un cuadro esquemático de las esclusas modificadas de 3 niveles Pospanamax en el sector del Pacífico y en el sector del Atlántico, respectivamente.



**SWINLOCKS: Esclusas Pospanamax modificadas de 3 niveles, para el sector Pacífico**



### SWINLOCKS: Esclusas Pospanamax modificadas de 3 niveles, para el sector Atlántico

La ACP calculó los niveles de los quicios o fondos de las cámaras de las esclusas y las antecámaras de las esclusas tomando en consideración un nivel mínimo de operación del agua de PLD +25.0 metros (+82.0 pies) en el lago Gatún, el calado de un buque de 15.24 metros (50 pies) y un espacio bajo la quilla de 1.52 metros (5.0 pies). La ACP estableció las medidas nominales de un buque Pospanamax como: manga de 45.73 metros (150 pies), calado de 15.24 metros (50 pies, en agua dulce tropical) y longitud de 385.7 metros (1,265 pies).

Al igual que en el diseño anterior de esclusas Pospanamax, se propone un sistema de llenado y vaciado de puertos múltiples para las esclusas modificadas de 3 niveles, con aberturas en ambos muros de las cámaras de las esclusas, justo sobre el fondo a lo largo de la longitud completa de la cámara. El fondo de las cámaras de las esclusas es plano y sin quicios.

Los sistemas de mitigación I y IV han sido modelados en el modelo de simulación SWINLOCKS.

*El Sistema de mitigación 1* (lavado por niveles de todas las cámaras de las esclusas) entra en operación después del esclusaje aguas arriba o aguas abajo de un buque, aunque no necesariamente después de cada esclusaje de un buque. La acción de mitigación se ejecuta en SWINLOCKS mediante un escenario separado de mitigación que describe los pasos subsiguientes del traslado del agua desde la antecámara a la poscámara. Las tinas de reutilización de agua no están activadas durante la ejecución de este escenario. La



cantidad de agua que se utiliza para lavar las cámaras de las esclusas en la acción mitigadora puede variar; la cantidad máxima es igual al uso 'normal' de agua. Se puede escoger una cantidad menor utilizando un factor de reducción  $\lambda$  ( $\lambda = 1$  significa que no hay reducción) en las fórmulas de balance del agua; se pueden escoger valores diferentes de  $\lambda$  para un esclusaje aguas arriba o aguas abajo. El intercambio de los coeficientes de sal se utiliza en las fórmulas de balance de la sal que describen la transferencia de sal.

*Sistema de mitigación II* (lavado de la cámara media y la cámara superior) se ha modelado de manera similar al sistema de mitigación I.

*Sistema de mitigación III* (lavado del agua salada desde un pozo con piso perforado) se ha modelado como una última acción dentro del escenario del esclusaje normal aguas arriba o aguas abajo de un buque. La cantidad de agua que se utiliza en la operación de lavado puede variar utilizando un factor  $\lambda$  de reducción similar al del sistema de mitigación I, en las fórmulas del balance del agua.

*Sistema de mitigación IV* (barrera de burbujas de aire a la entrada de la cámara inferior y, alternativamente, también a la entrada de la cámara superior) se ha modelado dentro de un escenario de un esclusaje normal aguas arriba o aguas abajo de un buque. El efecto de una barrera neumática se realiza mediante la multiplicación del coeficiente de intercambio  $e_x$  utilizado en el balance de sal del nivel de movimiento del buque, con un factor de reducción de  $\xi$ ; pueden escogerse valores diferentes a  $\xi$  para el esclusaje aguas arriba o aguas abajo, para la barrera en la cámara inferior y en la cámara superior. La barrera neumática puede desactivarse escogiendo  $\xi = 1$ .

Los coeficientes del intercambio de sal que se utilizan en los sistemas de mitigación I y II se basan, aunque no en su totalidad, en los coeficientes de intercambio que se utilizan en los pasos normales de nivelación del agua de las cámaras de las esclusas. Los coeficientes del intercambio de sal del sistema de mitigación III se han calculado con base en las simulaciones de flujo de densidad con nuestro programa numérico Delft3D. En el presente estudio partimos de la suposición de que toda el agua salada del pozo se drena cuando escogemos  $\lambda = 1.25$  en un esclusaje aguas abajo (que corresponde a un uso de agua estimado con magnitud de 100% a 150 % del uso 'normal' de agua) y  $\lambda = 0.5$  en un esclusaje aguas arriba (que corresponde a un uso estimado con magnitud de 25% a 75 % del uso 'normal' de agua). Cuando se aplica un valor menor que  $\lambda$ , se drena una cantidad proporcionalmente menor de agua salada. La porción que queda en el pozo de sal se pierde finalmente en el lago Gatún. El coeficiente de intercambio de sal que se utiliza en el balance de sal cuantifica la fuga de agua de sal hacia el lago y, por lo tanto, depende del factor de reducción  $\lambda$ .

Los valores del factor de reducción  $\xi$  en las fórmulas del balance de sal del sistema de mitigación IV se escogen con base en los datos experimentales.

Lo que aplica para los cuatro sistemas de mitigación es que los coeficientes que se escogen tendrían que estar basados en un estudio experimental adicional en la etapa final del diseño de las esclusas Pospanamax.

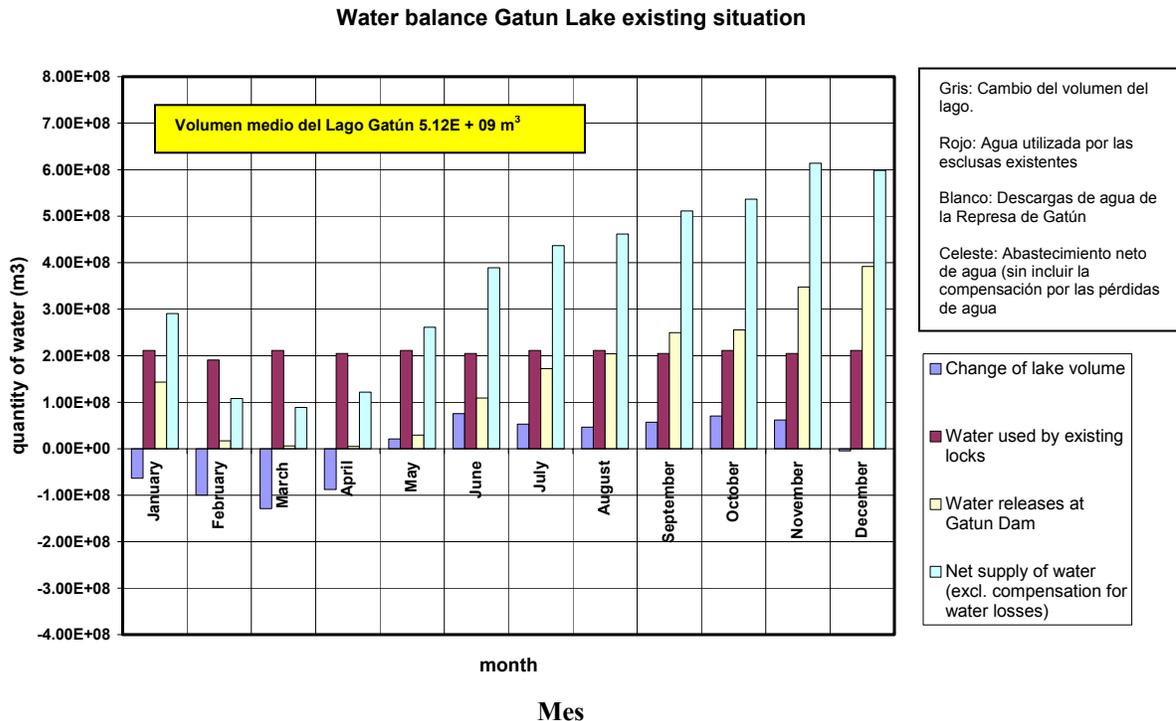


## 4 Control del agua en el lago Gatún

Para el presente estudio, la ACP seleccionó un nivel mínimo de operación del lago Gatún de PLD +25.0 metros (PLD + 82.0 pies) y un nivel máximo de operación de PLD +27.13 metros (PLD + 89.0 pies). Este es un rango de operación algo más amplio que el rango de los niveles representativos actuales con base en los promedios de 10 años que varían entre un mínimo de PLD +25.57 metros (+83.89 pies) y un máximo de PLD + 26.58 metros (+87.22 pies); un rango de nivel de agua más amplio es favorable, ya que ello permite una mejor utilización de la capacidad de almacenaje del lago. El nivel de agua del lago Miraflores se mantendrá al nivel de agua actual de alrededor de PLD +16.6 metros (PLD +54.4 pies).

El balance de agua actual del lago Gatún aparece en la próxima figura. Comenzando con la variación promediada del nivel de agua el lago, el cambio del volumen de agua durante el año se ha computado (volumen medio del agua del lago: 5.12 km<sup>3</sup>).

### Situación existente del balance de agua en el lago Gatún



La cantidad de agua que las esclusas existentes utilizan en la actualidad (en 36 tránsitos de buques al día) y la cantidad de agua que se descarga de la Represa de Gatún, se



muestran por separado en la figura anterior. Ambas cantidades suman  $4.42 \times 10^9$  metros cúbicos por año, lo que equivale al 86% del volumen medio del lago. Ello significa que el lago Gatún se reabastece casi totalmente cada año.

La cantidad de agua que se equilibra con estas pérdidas corresponde al abastecimiento neto de agua en el lago (el influjo natural del agua en el área de toma menos las pérdidas por evaporación y filtración, y menos la cantidad de agua que se saca para el consumo humano, etc.).

Después de la construcción de las esclusas Pospanamax se utilizará más agua del lago de Gatún. El volumen utilizado aumentará a medida que el tráfico de buques por el Canal de Panamá se intensifique y la cantidad de las operaciones de los esclusajes aumente. Este volumen de agua puede compensarse descargando menos agua de la represa de Gatún. Cuando ello no sea suficiente, habrá que suplir agua adicional con nuevas fuentes de agua. En caso de que a las esclusas Pospanamax se les equipe con tinas de reutilización de agua, se utilizaría una menor cantidad de agua del lago Gatún. Pero al mismo tiempo, la operación del sistema de mitigación de la intromisión de agua salada causaría, en general, una utilización adicional de agua.

En simulaciones anteriores y actuales de SWINLOCKS se han aplicado escenarios de control de agua para el lago Gatún. Los dos escenarios principales de control del agua en las simulaciones actuales son:

- **Abastecimiento libre de agua adicional para el lago Gatún**  
En este escenario de control de agua, la variación del nivel promediado del agua en 10 años se mantiene y las demandas adicionales de agua causadas por la operación de las nuevas esclusas y los sistemas de mitigación se compensan instantáneamente (en parte o totalmente) con una descarga menor de agua en la represa de Gatún (se aplican los datos sobre la descarga promediada del agua en 10 años); cuando ello no fuera suficiente, se supliría agua adicional al lago Gatún con nuevas fuentes de agua (un abastecimiento libre de agua adicional según se necesite; el punto de partida es que haya suficiente agua dulce adicional disponible para todo el año). El nivel de agua varía de PLD +25.57 metros (+83.89 pies) a PLD + 26.58 metros (+87.22 pies), es independiente de las demandas de agua de las esclusas Pospanamax y los sistemas de mitigación y permanece lejos de los límites adoptados PLD +25.0 metros (+82.0 pies) y PLD + 27.13 metros (+89.0 pies).
- **Un abastecimiento mínimo de agua adicional para el lago Gatún**  
En este escenario, se aplica el concepto de una reducción proporcional de las descargas de la represa de Gatún. Las descargas de agua se reducen para compensar por las demandas adicionales de agua causadas por la operación de las nuevas esclusas y los sistemas de mitigación, y se programan de tal manera durante todo el año (en comparación con las descargas actuales de la represa de Gatún, promediadas durante 10 años) que disminuye el abastecimiento de agua dulce adicional de los nuevos recursos de agua. El abastecimiento de agua dulce

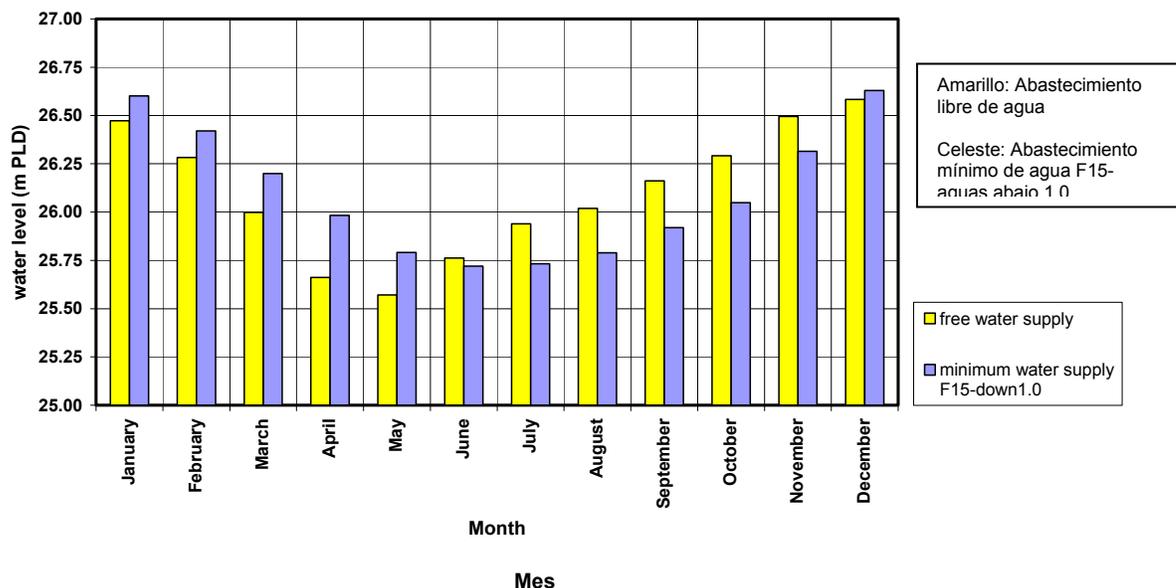


adicional se programa en proporción a las descargas actuales por todo el año, lo que significa que la mayor parte del agua adicional se abastece en la temporada de lluvias. Ello es favorable ya que generalmente hay más agua disponible durante la temporada de lluvias. El nivel del agua del lago Gatún varía aproximadamente en un valor promedio de PLD +26.1 metros (+85.6 pies, similar al actual) y se controla entre un mínimo de PLD +25.0 metros (PLD + 82.0 pies) y un máximo de PLD +27.13 metros (PLD + 89.0 pies) durante todo el año. El nivel del agua depende de la utilización de agua de las esclusas Pospanamax y los sistemas de mitigación.

La diferencia entre los dos escenarios de control de agua para el nivel de agua del lago Gatún aparece en la siguiente figura, que presenta el nivel del agua que se utiliza en las simulaciones con ‘abastecimiento libre de agua’ y como ejemplo, en la simulación F15-abajo1.0 con un ‘abastecimiento mínimo de agua’ (esclusas modificadas de 3 niveles, 3 tinajas de reutilización de agua por nivel, sistema de mitigación I aplicado en esclusaje aguas abajo,  $\lambda = 1.0$ ).

**Nivel de agua del lago Gatún – escenarios de control de agua de esclusas modificadas de 3 niveles con abastecimiento libre de agua y abastecimiento mínimo de agua**

**Water level Gatun Lake - revised 3-lift locks  
water control scenarios free water supply and minimum water supply**



La ACP también planea controlar las descargas de agua del lago Gatún de manera tal que el abastecimiento de agua adicional que se necesite para la operación de las esclusas Pospanamax y los sistemas de mitigación sea mínimo. Por dicha razón, este último



escenario de control de agua fue el escenario preferido en el programa de simulaciones SWINLOCKS.

El concepto de una reducción proporcional de las descargas de la represa de Gatún durante todo el año, y el abastecimiento proporcional de agua adicional según se necesite y que resulta en un abastecimiento mínimo de agua adicional para el lago Gatún, según se aplicó en las simulaciones, no puede aplicarse en una situación real, ya que la precipitación pluvial y la distribución de la misma por espacio de un año no se pueden conocer con anticipación. Sin embargo, el abastecimiento adicional de agua puede mantenerse al mínimo al descargar el agua sólo cuando su nivel amenace con sobrepasar el límite superior del nivel del lago Gatún. Cuando la capacidad de descarga de la represa de Gatún sea suficiente para descargar el control de inundaciones instantáneamente causadas por aguaceros intensos en el área de la cuenca del Canal, el nivel de agua donde debe comenzarse la descarga puede escogerse cerca del nivel del límite superior del lago.

Se ha establecido un programa de simulaciones que ha permitido el estudio de los sistemas de mitigación para las siguientes condiciones:

- Esclusas modificadas de 3 niveles sin tinas de reutilización de agua, 2 tinas por nivel y 3 tinas por nivel
- 15, 10 y 5 buques Pospanamax por día, además de la intensidad actual del tráfico de buques con 36 tránsitos por día en las esclusas existentes
- La operación única de los sistemas de mitigación I, II, III o IV
- La operación de los sistemas de mitigación en esclusajes aguas arriba y aguas abajo, en comparación con la operación del sistema de mitigación sólo en esclusaje aguas abajo
- El uso intensivo del sistema de mitigación I (en cada operación de esclusaje aguas abajo) en comparación con un uso menos intensivo del sistema de mitigación I (que tiene como resultado una efectividad menor pero una pérdida menor de agua)
- Un espacio bajo la quilla del buque de 3.05 metros (10 pies) en lugar de 1.52 metros (5 pies); esto exigía una elevación de 1.52 metros (5 pies) del piso de la cámara de la esclusa en las simulaciones
- Una combinación del sistema de mitigación I (el lavado por nivel de todas las tres cámaras de las esclusas) con el sistema de mitigación IV (la barrera neumática)
- Las condiciones hidráulicas reales tal como se dieron durante el período de 1992 al 2001.

Las simulaciones con las condiciones hidráulicas reales tal como se dieron durante el período de 1992 al 2001 son útiles para verificar la influencia de las variaciones reales del nivel de agua de los lagos en comparación con las variaciones promediadas del nivel del agua y las descargas afines de agua. Sin embargo, hay que señalar que el balance de agua del lago Gatún en estas simulaciones fue diferente en comparación con el balance de



agua durante el período de 1992 al 2001, ya que la utilización adicional de agua ocurriría por causa de la operación de las nuevas esclusas y los sistemas de mitigación.

Luego de estudiar los resultados de algunas simulaciones iniciales, la ACP tuvo preferencia por el sistema de mitigación I, posiblemente para aplicarlo en combinación con el sistema de mitigación IV (las ventajas del sistema I son: efectividad relativamente alta, no se necesitan inversiones adicionales para las esclusas Pospanamax, el sistema puede utilizarse según se necesite con diversa intensidad). Por ese motivo en el programa de las simulaciones se le prestó mayor atención al sistema de mitigación I que a los demás sistemas de mitigación.



## 5 Resultados de las simulaciones y conclusiones

En esta sección resumiremos primero las conclusiones generales de todos los sistemas estudiados de mitigación del I al IV.

Luego compararemos con mayor detalle los resultados de las simulaciones de las esclusas modificadas de 3 niveles sin tinas de reutilización de agua, con 2 tinas de reutilización de agua y con 3 tinas de reutilización de agua por nivel, para 15 buques Pospanamax al día. El sistema preferido de mitigación I (el lavado por nivel de las esclusas, o ‘esclusajes simulados’) se aplica a las operaciones de esclusaje aguas abajo, pero también analizamos la intromisión de agua salada cuando el sistema de mitigación no está activado. Además, comparamos los efectos de los dos escenarios de control de agua para el lago Gatún con abastecimiento mínimo de agua adicional y abastecimiento libre de agua adicional.

Finalmente, analizamos otros aspectos: la intensidad del tráfico de buques, el uso combinado de los sistemas de mitigación I y IV, el efecto de las condiciones hidráulicas reales y el efecto de un espacio mayor bajo la quilla. El análisis se enfoca en la concentración de sal promediada por volumen en los lagos, en las descargas de agua y en los abastecimientos de agua adicional del lago Gatún.

### *Sistemas de mitigación I - IV:*

- Para el presente estudio se han escogido cuatro sistemas diferentes de mitigación de la intromisión de agua salada para modelarlos con el simulador SWINLOCKS y analizar su efectividad. Por lo tanto, se ha simulado la intromisión del agua salada y el efecto de los sistemas de mitigación I – IV para las esclusas de 3 niveles sin tinas de reutilización de agua, con 2 tinas de reutilización de agua y con 3 tinas de reutilización de agua por nivel.
- Sin el sistema de mitigación, las esclusas Pospanamax modificadas de 3 niveles de menor tamaño que las esclusas originales de 3 niveles de diseño Pospanamax causan una carga menor de agua salada. La reducción de la concentración de sal promediada por volumen en el lago Gatún es del 20% al 25% (lo que es válido para 15 buques Pospanamax por día). El abastecimiento neto anual de agua del lago Gatún (= abastecimiento adicional de agua – descargas de agua) es también considerablemente menor.
- Los cuatro sistemas de mitigación que estudiamos disminuyen la carga de sal del lago Gatún, y a un grado menor, del lago Miraflores (a través de las esclusas de Pedro Miguel). El efecto de los sistemas de mitigación mejora cuando los sistemas de mitigación se combinan con las esclusas modificadas de 3 niveles con 2 tinas de reutilización de agua (configuración E), que cuando se combinan con las esclusas modificadas de 3 niveles con 3 tinas de reutilización de agua por nivel (configuración F). Ello ocurre por el mejor lavado de las cámaras de las esclusas



- en el caso de las esclusas con 2 tinas de reutilización de agua por nivel (los sistemas I y II causan una mayor utilización de agua durante el esclusaje), al igual que por el abastecimiento mayor de agua dulce al lago Gatún o porque la descarga menor de la represa de Gatún tiene un papel en el balance de sal del lago.
- Desde el punto de vista de la mitigación de la intromisión de agua salada, el sistema de mitigación II (con lavado de las cámaras central y superior de la esclusa) es la mejor opción, seguida inmediatamente por el sistema de mitigación I (el lavado por nivel de las tres cámaras de las esclusas). El sistema de mitigación III (con el pozo de sal en el lado aguas arriba de la cámara superior) tiene un efecto algo menor de lo esperado, pero la efectividad puede mejorarse cuando el pozo de sal se profundiza más de 17.0 metros de lo utilizado para las presentes simulaciones. El sistema de mitigación IV (la barrera neumática a la entrada de las cámaras inferior y superior de la esclusa) tiene un efecto relativamente reducido, pero tiene la ventaja de no causar ningún consumo adicional de agua.
  - Cuando los sistemas de mitigación se aplican tanto en los esclusajes aguas abajo como en los esclusajes aguas arriba de los buques, el efecto de los sistemas de mitigación es mejor que cuando la operación de los sistemas de mitigación se limita a los esclusajes aguas abajo de los buques. No obstante, ello ocurre a expensas de una utilización doble de agua.

Estas conclusiones aplican para los sistemas de mitigación que se operan con una efectividad máxima, lo que significa que una cantidad máxima de agua se utiliza en la operación del sistema de mitigación; por consiguiente, la utilización de agua que se causa con la operación de los sistemas de mitigación es relativamente alta (con excepción del sistema de mitigación IV, la barrera neumática, que funciona sin consumo adicional de agua). Los sistemas de mitigación I, II y III también pueden operarse utilizando una cantidad menor de agua, pero ello reduce su efectividad. Este tipo de operación no se está estudiando.

#### *Sistema de mitigación I:*

La mayoría de las simulaciones de intromisión de agua salada se han llevado a cabo para el sistema de mitigación I. El sistema de mitigación I no requiere inversiones adicionales para las esclusas modificadas de 3 niveles. El sistema puede activarse según se necesite y tiene alta efectividad cuando se opera después del esclusaje aguas abajo de cada buque. Por esa razón es el sistema preferido por la ACP, posiblemente en combinación con el sistema de mitigación IV. Los resultados de las simulaciones con una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax al día se presenta en las siguientes figuras (la configuración E de 2 tinas de reutilización de agua por nivel, la configuración F: de 3 tinas de reutilización de agua por nivel). Hay una distinción entre los escenarios de control de agua con un 'abastecimiento mínimo de agua' y 'abastecimiento libre de agua'. El sistema de mitigación I solamente se opera después del esclusaje aguas abajo de los buques; se aplica una cantidad máxima de agua ('abajo 1.0',  $\lambda = 1.0$ ). La indicación

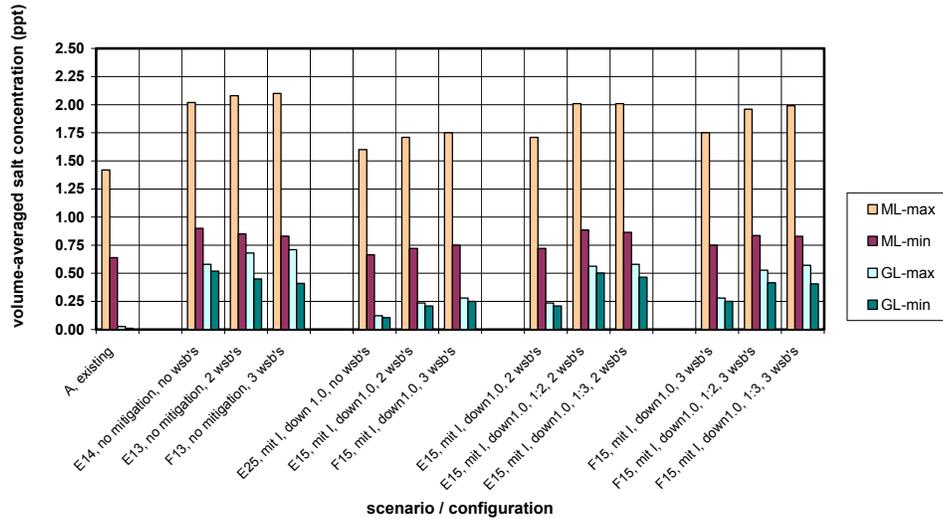


1:2 ó 1:3 significa que la acción de mitigación se lleva a cabo con cada segundo o tercer buque.



**Concentración de sal en el lago Miraflores y el lago Gatún  
Esclusas modificadas de 3 niveles,  
abastecimiento mínimo de agua, 15 buques Pospanamax por día**

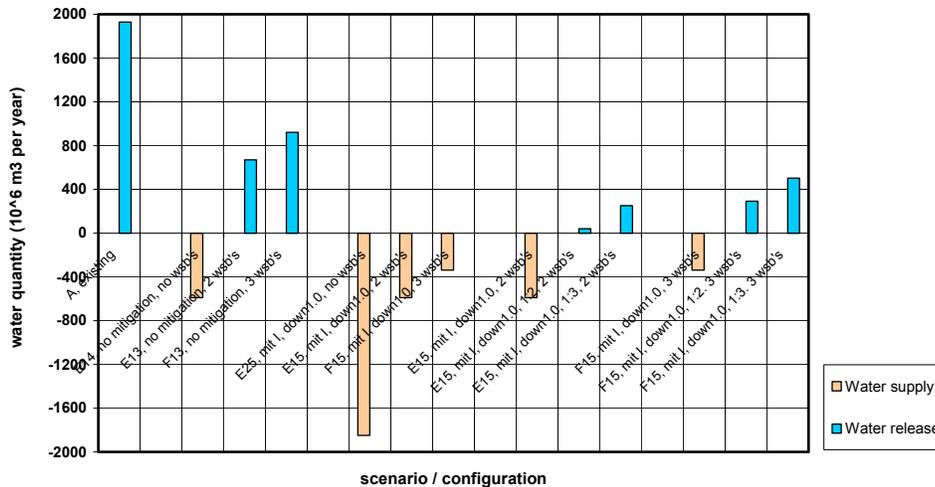
Salt concentration Miraflores Lake and Gatun Lake  
rev. 3-lift locks, minimum water supply, 15 PP-ships/day



**Escenario y configuración**

**Descarga de agua y abastecimiento adicional de agua por año al lago Gatún  
Esclusas modificadas de 3 niveles,  
abastecimiento mínimo de agua,  
15 buques Pospanamax por día**

Water release and extra water supply per year Gatun Lake  
rev. 3-lift locks, minimum water supply, 15 PP-ships/day

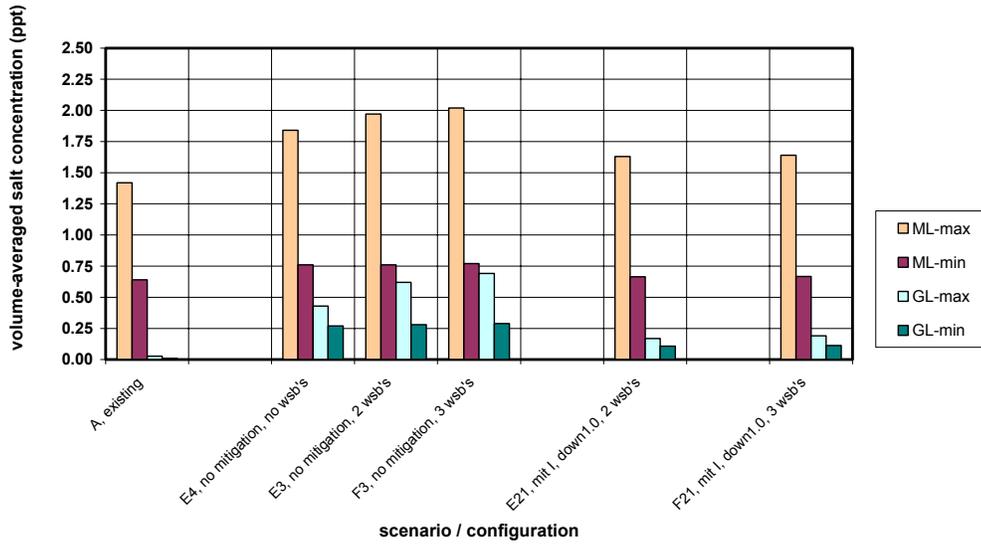


**Escenario y configuración**



**Concentración de sal en el lago Miraflores y el lago Gatún  
Esclusas modificadas de 3 niveles,  
abastecimiento libre de agua, 15 buques Pospanamax por día**

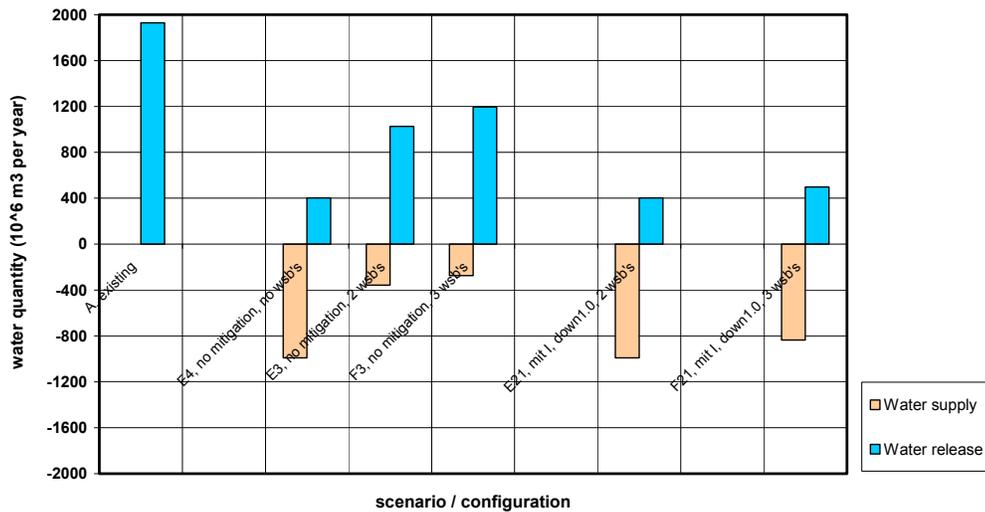
**Salt concentration Miraflores Lake and Gatun Lake  
rev. 3-lift locks, free water supply, 15 PP-ships/day**



**Escenario y configuración**

**Descarga de agua y abastecimiento adicional de agua por año al lago Gatún  
Esclusas modificadas de 3 niveles,  
abastecimiento libre de agua,  
15 buques Pospanamax por día**

**Water release and extra water supply per year Gatun Lake  
rev. 3-lift locks, free water supply, 15 PP-ships/day**





### Escenario y configuración

De estos resultados para una intensidad de tráfico de 15 buques Pospanamax por día concluimos que:

- Cuando no se aplica un sistema de mitigación y no se les proporciona tinas de reutilización de agua a las esclusas modificadas de 3 niveles, es necesario abastecer al lago Gatún con agua adicional con nuevas fuentes de agua. Con 2 tinas de reutilización de agua por nivel, o 3 tinas de reutilización de agua por nivel, sin mitigación, hay un excedente neto de agua a través de todo el año, de manera que habrá agua para la generación de energía eléctrica, pero también hay un lavado menor de las cámaras de las esclusas, lo que ha de causar una mayor intromisión de agua salada y niveles mayores de concentración de sal en los lagos.
- El escenario de control de agua con abastecimiento libre de agua siempre requiere un abastecimiento adicional de agua y también cuando las tinas de reutilización de agua están en operación. Sin embargo, en la temporada de lluvias se descarga el agua. En el escenario de control de agua con un mínimo de abastecimiento de agua, el agua disponible se utiliza mejor, lo que lleva a un abastecimiento mínimo de agua adicional al lago Gatún (aunque la cantidad de la descarga de agua y el abastecimiento adicional de agua por año son los mismos en ambos escenarios).
- La utilización de agua durante los esclusajes se reduce un 50% y un 60%, respectivamente, cuando se aplican las 2 tinas de reutilización de agua por nivel o 3 tinas de reutilización de agua por nivel (sin activar el sistema de mitigación). Mientras menos sea el agua utilizada durante el esclusaje, menor será el abastecimiento de agua adicional al lago Gatún y /o mayor será la descarga de agua en la represa de Gatún, y más fuerte será la variación de la concentración de sal en el lago Gatún durante el año (véase la tabla siguiente). De esa manera, el abastecimiento de agua adicional tiene el efecto de aminorar la variación de la concentración de sal durante el año. (Nota: la utilización relativa por los esclusajes durante cada transferencia de buque es de 100%, cuando las esclusas Pospanamax no tienen tinas de reutilización de agua.)

Simulación	Abastecimiento de agua adicional	Cantidad de tinas de reutilización de agua por nivel	Uso relativo de agua durante esclusajes con las esclusas Pospanamax	Concentración de sal del lago Gatún (ppt, promediada por volumen)		
				Rango	Variación	Media
E14	Mínimo	0	100%	0.52 -0.58	0.06	0.55
E13	Mínimo	2	50%	0.43 -0.68	0.23	0.56
F13	Mínimo	3	40%	0.41 -0.71	0.30	0.56
E4	Libre	0	100%	0.27 -0.43	0.16	0.35
E3	Libre	2	50%	0.28 -0.62	0.34	0.45
F3	Libre	3	40%	0.29 -0.69	0.40	0.49



- La concentración media de sal del lago Gatún, promediada por volumen (media del máximo y del mínimo en un año) no es inversamente proporcional al agua utilizada por los esclusajes Pospanamax (y por lo tanto la cantidad de tinas de reutilización de agua), véase la tabla anterior, ya que también tienen un papel en el balance de agua y el balance de sal del lago Gatún, los abastecimientos adicionales de agua, las descargas de la represa de Gatún y los tránsitos por las esclusas existentes.
- Desde el punto de vista de la conservación del agua, el escenario de control de agua con un mínimo de abastecimiento de agua es la mejor opción, pero es menos favorable en vista de los niveles de concentración de sal que son mayores, mientras que también habría menos agua para la generación de energía eléctrica. Compárense los resultados de E14-E13-F13 con E4-E3-F3 en la tabla anterior.
- El escenario de control de agua con un mínimo de abastecimiento de agua causa una variación menor en la concentración de sal del lago Gatún que el escenario con abastecimiento libre de agua, mayormente porque los valores de la concentración mínima de sal, que ocurren al final de la temporada de lluvias, continúan altos. Compárense los resultados de E14-E13-F13 con E4-E3-F3 en la tabla anterior.
- Cuando el sistema de mitigación I se aplica a los esclusajes aguas abajo (con las esclusas Pospanamax), la carga de agua salada del lago Gatún, y por lo tanto la concentración de sal promediada por volumen se reduce considerablemente, véase la tabla siguiente. La reducción de la concentración media de sal es del 50% al 80%, dependiendo de la cantidad de tinas de reutilización de agua y del escenario de control de agua que se aplique. Sin embargo, es extraordinario el efecto que el sistema de mitigación I reduce cuando el sistema de mitigación se utiliza sólo después de cada segundo (1:2) o tercer (1:3) esclusaje de buques (estudiado para el escenario de control de agua con abastecimiento mínimo de agua, pero con toda probabilidad este efecto también ocurrirá con el escenario de control de agua con abastecimiento libre de agua). Lo más probable es que la reducción de la efectividad cuando el sistema sólo se aplica con cada segunda o tercera operación de esclusaje aguas abajo la causa el hecho de que las concentraciones mayores de sal pueden elevarse en la cámara superior de la esclusa en la operación del tipo de semiconvoy. Pero también el balance diferente de agua del lago Gatún juega un papel cuando el sistema de mitigación se utiliza con menos intensidad (menos abastecimiento de agua, mayor descarga de agua en la represa de Gatún, una distribución diferente de agua sobre la represa de Gatún y las esclusas de Gatún).



Simulación	Abastecimiento de agua adicional	Cantidad de tinas de reutilización de agua por tinas	Concentración de sal media en el lago Gatún, promediada por volumen, sin mitigación	Lago Gatún: reducción de la concentración de sal media con sistema de mitigación I comparada con ninguna mitigación (%)		
				Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:1	Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:2	Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:3
E14-E25	Mínimo	0	0.55	79%	-	-
E13-E15	Mínimo	2	0.56	61%	6%	7%
FE13-F15	Mínimo	3	0.56	53%	16%	13%
E4	Libre	0	0.35	-	-	-
E3-E21	Libre	2	0.45	69%	-	-
F3-F21	Libre	3	0.49	69%	-	-

La tabla siguiente muestra la pérdida relativa correspondiente de agua por transferencia de buque causada por la operación de las esclusas Pospanamax y el sistema de mitigación I.

Simulación	Abastecimiento de agua adicional	Cantidad de tinas de reutilización de agua por nivel	Pérdida relativa de agua por esclusaje con las esclusas Pospanamax con cada transferencia de buque, sin mitigación	Pérdida relativa de agua de las esclusas Pospanamax y el sistema de mitigación I, por cada transferencia de buque		
				Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:1	Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:2	Mitigación I, aguas abajo 1.0, 1:3
E14-E25	Mínimo	0	100%	150%	-	-
E13-E15	Mínimo	2	50%	100%	125%	67%
FE13-F15	Mínimo	3	40%	90%	65%	57%
E4	Libre	0	100%	-	-	-
E3-E21	Libre	2	50%	100%	-	-
F3-F21	Libre	3	40%	90%	-	-

- Generalmente el efecto indirecto de las esclusas Pospanamax, que pasan por alto el lago Miraflores, sobre la concentración de sal del lago Miraflores, es relativamente pequeño. El agua salada adicional se introduce a través de las esclusas de Pedro Miguel; la carga de sal varía con la concentración de sal del



lago Gatún, y varía de esta manera con la configuración de las esclusas Pospanamax, la aplicación de un sistema de mitigación, y el escenario de control de agua del lago Gatún.

Veamos ahora otros aspectos:

*Efecto de la intensidad de tráfico con las esclusas Pospanamax:*

- Tal como se podría esperar, la intromisión del agua salada aumenta con la intensidad del tráfico de buques. Los resultados detallados de las simulaciones se presentan en la Sección 7.1.2. En la siguiente tabla se indica la concentración media de sal del lago Gatún, promediada por volumen para 15, 10 y 5 buques Pospanamax por día (la media del máximo y mínimo en un año). No se comparan la falta de mitigación, el sistema de mitigación I ni la combinación de sistemas de mitigación I y IV. Como se indica, la relación entre la concentración de sal promediada por volumen y la cantidad de transferencias de buques no es lineal, ya que las descargas de agua y los abastecimientos de agua juegan un papel al igual que la navegación en las vías existentes.

Simulación	Abastecimiento de agua adicional	Cantidad de tinas de reutilización de agua por nivel	Sistema de mitigación	Lago Gatún: concentración media de sal con varias intensidades de tráfico por las esclusas Pospanamax		
				15 PP por día	10 PP por día	5 PP por día
E14	Mínimo	0	Sin mitigación	0.55	0.22	0.04
E13	Mínimo	2	Sin mitigación	0.57	0.22	0.08
FE13	Mínimo	3	Sin mitigación	0.56	0.25	0.10
E25	Mínimo	0	Mitigación I, aguas abajo 1.0	0.11	0.09	0.03
E15	Mínimo	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0	0.22	0.11	0.04
F15	Mínimo	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0	0.27	0.11	0.04
E19	Mínimo	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0 con mitigación IV, d0.2	0.19	0.10	0.04
F19	Mínimo	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0, con mitigación IV, d0.2	0.23	0.10	0.04



E4	Libre	0	Sin mitigación	0.35	0.13	0.03
E3	Libre	2	Sin mitigación	0.45	0.20	0.08
F3	Libre	3	Sin mitigación	0.49	0.24	0.11
E21	Libre	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0	0.14	0.07	0.03
F21	Libre	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0	0.15	0.7	0.03

La tabla siguiente muestra el abastecimiento de agua adicional y las descargas de agua correspondientes por año:

Simulación	Abastecimiento de agua adicional	Cantidad de tinajas de reutilización de agua por nivel	Sistema de mitigación	Lago Gatún: Abastecimiento de agua adicional y descargas de agua en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> por año, diversas intensidades de tráfico con esclusas Pospanamax					
				15 PP por día		10 PP por día		5 PP por día	
				Abastecimiento	Descarga	Abastecimiento	Descarga	Abastecimiento	Descarga
E14	Mínimo	0	Sin mitigación	-589	0	0	250	0	1090
E13	Mínimo	2	Sin mitigación	0	670	0	1090	0	1510
FE13	Mínimo	3	Sin mitigación	0	922	0	1258	0	1593
E25	Mínimo	0	Mitigación I, aguas abajo 1.0	-1848	0	-589	0	0	670
E15	Mínimo	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0	-589	0	0	250	0	1090
F15	Mínimo	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0	-337	0	0	418	0	1174
E19	Mínimo	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0 con mitigación IV, d0.2	-589	0	0	250	0	1090
F19	Mínimo	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0, con mitigación IV, d0.2	-337	0	0	418	0	1174
E4	Libre	0	Sin mitigación	-992	402	-524	774	-219	1309
E3	Libre	2	Sin mitigación	-357	1027	-219	1309	-81	1590
F3	Libre	3	Sin mitigación	-274	1196	-164	1421	-54	1647
E21	Libre	2	Mitigación I, aguas abajo 1.0	-402	402	-524	774	-219	1309
F21	Libre	3	Mitigación I, aguas abajo 1.0	-835	498	-455	873	-191	1365



- En el período inicial no hay necesidad de abastecer al lago Gatún con agua adicional, siempre y cuando se aplique el escenario de control de agua con abastecimiento mínimo de agua.

#### *Uso combinado de los sistemas de mitigación I y IV:*

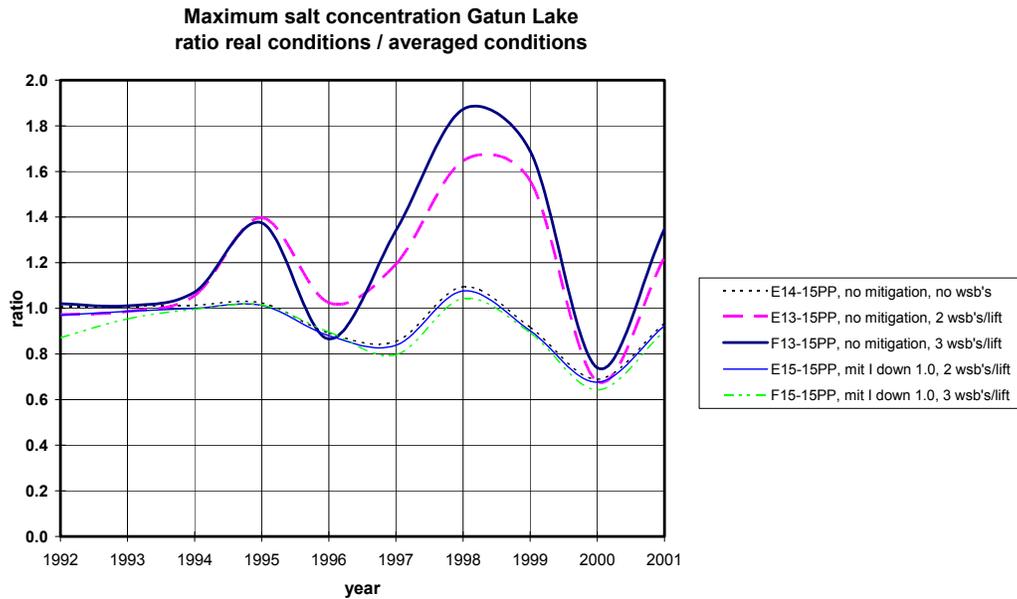
- El uso combinado de los sistemas de mitigación I y IV puede reducir la concentración de sal promediada por volumen del lago Gatún alrededor del 15% en comparación con el uso del sistema de mitigación I solamente. Hay que observar, sin embargo, que no existen datos experimentales para las barreras neumáticas que se instalan en el agua con una profundidad tan grande como la del Canal de Panamá. Hay que verificar el funcionamiento de las barreras neumáticas en aguas profundas.
- Cuando se considera la concentración de sal del lago Gatún, las esclusas modificadas de 3 niveles con 2 tinajas de reutilización de agua por nivel y el sistema de mitigación I (operadas en los esclusajes aguas abajo) son más o menos equivalentes a las esclusas modificadas de 3 niveles con 3 tinajas de reutilización de agua por nivel y la combinación de los sistemas de mitigación I y IV (operados en esclusajes aguas abajo), véase los resultados en rojo en las tablas anteriores. Cierta cantidad de agua puede ahorrarse entonces aplicando 3 tinajas de reutilización de agua en lugar de 2 tinajas de reutilización de agua por nivel, mientras que la intromisión resultante del agua salada adicional se combate con una barrera neumática que se instala en la entrada de la cámara superior y la cámara inferior de la esclusa.

#### *El efecto de las condiciones hidráulicas reales*

- Cuando las condiciones hidráulicas reales del período de 1992 al 2001 se toman como punto de partida para las simulaciones en lugar de las condiciones promedio, la variación de la concentración de sal del lago Gatún promediada por volumen es más marcada. Esto se indica en la próxima figura, en la que la proporción de la concentración *máxima* de sal promediada por volumen en condiciones reales y la concentración *máxima* promediada por volumen en condiciones promediadas se ha marcado para unos pocos casos. De esta figura deducimos que mientras más agua dulce se supla al lago Gatún (E14, E15, F15), menos varía la proporción alrededor de 1. Es claro que el abastecimiento de agua adicional tiene un efecto de aminorar la variación de la concentración de sal. Este efecto se estudia en el escenario de control de agua con abastecimiento mínimo de agua. Un efecto similar puede esperarse con el escenario de control de agua con abastecimiento libre de agua.



## Concentración máxima de sal en el lago Gatún Proporción entre las condiciones reales y las condiciones promediadas



- Las simulaciones en las que las condiciones hidráulicas reales del período de 1992 al 2001 se han tomado como punto de partida, indican que la variación de un año a otro en la concentración de sal del lago Gatún puede ser el doble de alta que lo computado para las condiciones hidráulicas promediadas.

### *Efecto de un mayor espacio debajo de la quilla:*

El efecto de una profundidad mayor de agua de 1.52 metros (5 pies) en las cámaras de las esclusas de las esclusas modificadas de 3 niveles sobre la intromisión del agua salada es relativamente pequeño (un nivel menor del piso de 1.52 metros en vista de un espacio debajo de la quilla de 3.05 metros (10 pies) en lugar de 1.52 metros (5 pies). La profundidad mayor no tiene efecto en la utilización de agua durante los esclusajes que causan los sistemas de mitigación, los abastecimientos de agua adicionales del lago Gatún y las descargas de agua en la represa de Gatún. Cuando se requiere un espacio debajo de la quilla de 3.05 metros (10 pies) para una navegación segura, los resultados de las simulaciones de la intromisión de la sal que se presentan en este informe para un espacio debajo de la quilla de 1.52 metros (5 pies) en las cámaras de las esclusas modificadas de 3 niveles pueden aplicarse de manera aproximada.



## 6 Conclusiones y recomendaciones principales

Siempre que se pueda disponer de nuevas fuentes de agua, la mejor opción desde el punto de vista de la mitigación de la intromisión del agua salada es construir esclusas Pospanamax sin tinas de reutilización de agua. El lavado por niveles de todas las cámaras de las esclusas (sistema de mitigación I) debe hacerse por lo menos después de cada operación de esclusaje aguas abajo. Es necesario abastecer de agua adicional al lago Gatún inmediatamente para compensar la mayor utilización de agua que causa la operación de las esclusas nuevas y el sistema de mitigación (abastecimiento libre de agua). En dicho caso, la intromisión del agua salada se combate con mayor efectividad y las cantidades actuales de agua quedan disponibles para la generación de energía eléctrica en la represa de Gatún.

Sin embargo, no existe la certeza de que se pueda disponer de cantidad abundante de agua adicional o si es aceptable. Por lo tanto, el objetivo de la ACP es minimizar las demandas de agua que se causan con la operación de las esclusas Pospanamax y los sistemas de mitigación, pero está claro que con una intensidad creciente de tráfico de buques Pospanamax, aumenta la necesidad de suplir agua adicional al lago Gatún. La ACP planea controlar las descargas de agua de la represa de Gatún de tal manera que el abastecimiento de agua adicional durante el año sea mínimo. Generalmente, esto causará un nivel de concentración de sal mayor en el lago Gatún que con un abastecimiento libre de agua adicional.

Los escenarios de control de agua que se enfocan en un abastecimiento mínimo de agua adicional al lago Gatún piden una planificación activa y cuidadosa de las descargas de agua de la represa de Gatún. Ello impondrá demandas más fuertes a la operación de la planta eléctrica y los vertederos de la represa de Gatún. Además, debido a que hay una cantidad considerablemente menor de agua disponible en la represa de Gatún para la generación de energía eléctrica, podría ser necesario buscar fuentes adicionales de energía.

El concepto de un abastecimiento mínimo de agua adicional al lago Gatún exige que el agua de la represa de Gatún se descargue solamente cuando el nivel de agua amenace con sobrepasar el nivel del límite superior del lago Gatún. Cuando la capacidad de descarga de la represa de Gatún sea suficiente para descargar instantáneamente el agua por causa de aguaceros intensos en el área de la cuenca del Canal de Panamá, el nivel del agua donde debe comenzar la descarga del agua puede escogerse cerca del nivel del límite superior del lago.

Se obtiene una pérdida mínima de agua cuando se les proporciona a las esclusas Pospanamax tinas de reutilización de agua y las cámaras de las esclusas se utilizan óptimamente (o sea, mediante el esclusaje de dos buques a la vez cuando sea posible). Los sistemas de mitigación causan una demanda considerable de agua adicional. Debido



a que la intromisión de agua salada en el esclusaje aguas arriba de los buques es mucho menor que la de los esclusajes aguas abajo, los sistemas de mitigación deben operarse preferiblemente sólo con los esclusajes aguas abajo. Ello reduce las demandas de agua del sistema de mitigación por un factor de 2.

Desde el punto de vista de la conservación del agua, la opción de 3 tinas de reutilización de agua por nivel es mejor que la opción de 2 tinas de reutilización por nivel, pero el ahorro adicional de agua en el caso de las 3 tinas tiene que considerarse en relación con la demanda total de agua que ocurre con la operación de las esclusas y los sistemas de mitigación, y en relación con la carga algo mayor de sal. La carga mayor de sal en el caso de las 3 tinas puede combatirse con una barrera neumática (sistema de mitigación IV) a la entrada de la cámara inferior y la cámara superior de las esclusas.

Aconsejamos escoger la opción de las 3 tinas en combinación con el sistema de mitigación I (lavado por nivel de todas las cámaras de las esclusas) y tomar medidas en el diseño de las esclusas que permitan una construcción fácil de barreras neumáticas adicionales según se necesiten. Sin embargo, hay que observar que las barreras neumáticas son más efectivas cuando se minimiza el tiempo que las compuertas de la entrada de las cámaras permanecen abiertas. Esto implica que las compuertas deben abrirse únicamente por corto tiempo para que un buque pase, pero como resultado, ocurrirán diferencias del nivel de agua por causa de la variación de la marea (particularmente en el sector Pacífico). Estas diferencias en el nivel del agua pueden evitarse, según se necesite, cuando las válvulas del sistema de alcantarillas entre la poscámara y la cámara inferior de la esclusa se mantengan abiertas (ello también causa una intromisión adicional de agua salada, pero es una mejor opción que dejar las compuertas abiertas). En conclusión, cuando se aplican las barreras neumáticas, no puede mantenerse la operación actual de las esclusas existentes que permite que se abran las compuertas con anticipación.

Se aconseja que el sistema de mitigación I se aplique después de cada operación de esclusaje aguas abajo, ya que las simulaciones indican que la efectividad se reduce mucho cuando el sistema de mitigación se utiliza solamente con cada segundo o tercer esclusaje aguas abajo. Como consecuencia, cuando se aplican los esclusajes de relevo u otra forma similar de ahorro de tiempo, parte del tiempo ahorrado se necesita para las operaciones de mitigación entre dos esclusajes subsiguientes. La capacidad del nuevo carril se afectará de esa manera. Por lo tanto, se aconseja que se estudie la manera más eficiente de manejar los buques en las esclusas y operar el sistema de mitigación I.

Cuando no haya cabida para demoras, la mejor alternativa será el sistema de mitigación II (el pozo de recolección de sal).

Inicialmente, cuando la intensidad de buques Pospanamax todavía sea baja, habrá tiempo para evaluar la intromisión del agua salada en la situación real y decidir cuál debe ser el uso óptimo del sistema de mitigación I, posiblemente en combinación con el sistema de



mitigación IV. Para este propósito, se debe instalar a ambos lados del Canal un sistema de monitoreo de la intromisión del agua salada.

Se aconseja que antes de decidir instalarlas se verifique el funcionamiento correcto de las barreras neumáticas (sistema de mitigación IV), ya que no existen datos sobre su aplicación en aguas profundas como las del Canal de Panamá.



## 7 Estudios adicionales

El modelo de simulación SWINLOCKS se ha instalado con el propósito de pronosticar la carga de sal en el lago Gatún y en el lago Miraflores después de que se construya el nuevo tercer carril del Canal de Panamá y que el mismo esté en operación. El modelo de simulación ofrece la posibilidad de comparar los efectos de la intromisión de agua salada en diversos diseños de las esclusas Pospanamax, con tinas de reutilización de agua o sin ellas, con sistemas de mitigación de la intromisión de agua salada o sin ellos, para diversos escenarios de control de agua del lago Gatún y para diferentes intensidades de tráfico de buques Pospanamax, al igual que para comparar las posibles condiciones futuras de la situación existente. Por lo tanto, constituye una herramienta para quienes han de tomar las decisiones con el fin de dar luces sobre los posibles efectos ambientales de las futuras esclusas Pospanamax, tanto en términos de la intromisión del agua salada como de las necesidades adicionales de agua dulce.

Debido a que el modelo de simulación SWINLOCKS no puede computar la dispersión de agua salada en los lagos que depende del paso del tiempo, la concentración computada de sal promediada por volumen no proporciona un cuadro de las concentraciones de agua salada en los lagos. Sin embargo, lo más probable es que una fuerte variación de concentración de sal ocurra en el lago Gatún y en el Corte Gaillard. El agua salada que se introduce se propaga a lo largo del lecho de los cauces de navegación y sigue por las partes más profundas del lago (por ejemplo, la hondonada del viejo río Chagres). Entonces podrá concentrarse en el área más profunda cerca de las salidas de la represa de Gatún o permanecer en la parte profundizada del cauce de navegación en el Corte Gaillard. Las computaciones tridimensionales de la densidad del flujo pueden ilustrar los procesos de dispersión de la sal en el lago.

Las computaciones con el modelo tridimensional de flujo deben hacerse durante un período suficientemente largo de tiempo tomando en consideración las variaciones de precipitación según la temporada, los niveles de agua del lago, los abastecimientos de agua y las descargas de agua, las cargas de agua salada que dependen del paso del tiempo a través de las esclusas y los desarrollos de las intensidades del tráfico de los buques. Los efectos de la navegación de los buques (que son causados por las revoluciones de las hélices y las corrientes de retorno, que son particularmente importantes en el Corte Gaillard) y el viento, deben tomarse en consideración. Sin embargo, es dudoso que estas computaciones tan complicadas sean totalmente factibles; en todo caso requieren un modelaje y esfuerzos de computación inmensos.

Por lo tanto, hay que realizar más computaciones esquematizadas de dos dimensiones (promediadas con la profundidad) para estudiar los patrones generales de flujo en el lago Gatún y el Corte Gaillard sin los efectos de las diferencias de densidad, seguidas por computaciones tridimensionales de flujo para las partes relevantes de los lagos, por ejemplo, el Corte Gaillard o el área norte del lago Gatún, que incluyan los flujos de



densidad locales. Este enfoque computacional es más atractivo y está más al alcance de las posibilidades actuales.

Las computaciones esquematizadas proporcionarán mayor información sobre los flujos locales de agua salada de gran importancia, incluso los flujos hacia y cerca de las salidas de la represa de Gatún, y también pueden brindar una indicación confiable de los niveles de salinidad en las inmediaciones de, por ejemplo, la toma para el agua potable en el Corte Gaillard cerca de Paraíso. Las computaciones tridimensionales de flujo pueden realizarse utilizando las cargas de agua salada que se computan con el modelo SWINLOCKS de simulación de la intromisión del agua salada, utilizándolas como datos de entrada. Las computaciones del flujo en dos y tres dimensiones requieren el modelaje de la batimetría del lago Gatún y del Corte Gaillard en sus áreas de interés. Los límites de las áreas modeladas y de las condiciones de los límites deben escogerse cuidadosamente.

Se le aconseja a la ACP que investigue las posibilidades de computaciones de flujo de dos dimensiones y de computaciones de flujo (local) tridimensionales para la configuración escogida de las esclusas Pospanamax, incluso un sistema de mitigación de la intromisión de agua salada. Estas computaciones proporcionarán una mejor comprensión de los procesos de dispersión de la sal. Como resultado podrá evaluarse mejor el valor de los coeficientes de intercambio de sal que se utilizan en las simulaciones con SWINLOCKS, en particular los coeficientes usados para las descargas de agua en la represa de Gatún. Cuando parezca que los coeficientes aplicados actualmente no son óptimamente adecuados para pronosticar la carga de agua salada y la descarga de agua salada, se aconseja repetir algunas simulaciones selectas con SWINLOCKS con coeficientes adaptados.

Aunque se puede hacer una comparación de los diseños de las esclusas en cuanto al tema de la intromisión del agua salada y la demanda de agua con la ayuda de SWINLOCKS y es posible hacer la escogencia del diseño más adecuado para las esclusas, todavía se necesitan mayores estudios sobre la intromisión del agua salada en la etapa final del diseño de las esclusas Pospanamax que se escojan. Estos estudios deben enfocarse en el proceso de la intromisión del agua salada a través de las esclusas y en el funcionamiento de los sistemas propuestos de mitigación, pero algunos otros aspectos afines necesitan mayor estudio. Hay que estudiar todos los aspectos y su conexión mutua.

Los temas importantes de estudio son:

- El sistema de llenado y vaciado de las esclusas (la operación de las alcantarillas, la operación de las tinas de reutilización de agua, la capacidad de flujo del sistema, los tiempos de llenado y vaciado, el control del proceso de llenado y vaciado considerando una buena distribución del agua que entra y sale, los efectos de la inercia en las alcantarillas que posiblemente causen un llenado excesivo súbito en la cámara de la esclusa, la sedimentación en las



- alcantarillas, el aire que se atrapa en las alcantarillas, el fenómeno posible de la cavitación, las fuerzas dinámicas que se ejercen sobre las válvulas).
- El fenómeno del flujo (de densidad) en las cámaras de las esclusas durante la nivelación hacia arriba y hacia abajo, los procesos de mezcla, el fenómeno del oleaje interno, el fenómeno de la traslación del oleaje.
  - Las fuerzas (dinámicas) sobre las compuertas de las esclusas y sobre el buque a causa de los flujos, los oleajes y diferencias de densidad, y las fuerzas que se ejercen sobre las líneas de amarre del buque.
  - El fenómeno (de la densidad) del flujo y del fenómeno del oleaje en las cámaras, antecámaras y poscámaras de las esclusas cuando se abren las compuertas, los efectos del movimiento de los buques.
  - El funcionamiento de los sistemas de mitigación que se escojan.
  - Las maniobras de los buques que se aproximan.

Los estudios de la intromisión del agua deben enfocarse, en particular, en el fenómeno del flujo de la densidad y los procesos de mezcla en las cámaras, antecámaras y poscámaras de las esclusas en el diseño final de las mismas, incluso las tinas de reutilización de agua y los sistemas de mitigación. Los sistemas de mitigación I y II exigen una verificación del fenómeno que ocurre cuando se da la transferencia de agua por los niveles de una cámara a otra cámara de la esclusa sin abrir las compuertas de las esclusas; el sistema de mitigación III (con el pozo de sal) exige una verificación del proceso del influjo de agua salada y la descarga subsiguiente de agua del pozo de sal; y el funcionamiento del sistema de mitigación IV (con la barrera neumática) tiene que verificarse para probar su funcionamiento en el agua profunda del Canal de Panamá. Con los cuatro sistemas de mitigación ocurre que los coeficientes que se escogen para utilizarlos con las simulaciones de SWINLOCKS deben basarse en mayores estudios experimentales en la etapa final del diseño de las esclusas Pospanamax.

Se aconseja realizar el modelaje a escala en combinación con el modelaje numérico. Las pruebas de los modelos a escala se necesitan para estudiar los procesos físicos y apoyar la inclusión de los detalles del diseño, mientras que los modelos matemáticos pueden utilizarse para estudiar los procesos generales y los efectos a largo plazo en la calidad del agua. Los modelos a escala deben comprender, preferiblemente, una configuración de la poscámara de las esclusas que incluya los elementos correspondientes de las tinas de reutilización de agua y los sistemas de mitigación.

La disponibilidad del agua dulce adicional proveniente de nuevas fuentes de agua tiene una fuerte relación con la operación de las esclusas Pospanamax y la lucha contra la intromisión del agua salada en el lago Gatún. Se aconseja que se estudie a cabalidad en el futuro el control de agua del lago Gatún tomando en consideración las variaciones naturales de la precipitación pluvial en el área de la cuenca del Canal de Panamá, la



creciente necesidad de agua para la operación de las esclusas existentes y Pospanamax, incluso los sistemas de mitigación, la creciente necesidad de agua dulce para el uso doméstico y la industria, la necesidad de agua para la generación de energía eléctrica, así como la consideración de las demandas que genera la preservación de un ambiente acuático saludable. Ello requiere un enfoque integrado de la administración de la cuenca hidrográfica.

Cuando se opta por un abastecimiento mínimo de agua dulce adicional, el agua del lago Gatún debe mantenerse al mayor nivel que sea posible en la temporada de lluvias. Con un método semejante de control de agua, el agua sólo se descarga desde el lago cuando el nivel de agua amenaza sobrepasar el nivel del límite superior. Cuando la capacidad de descarga de la represa de Gatún sea suficiente para descargar instantáneamente inundaciones por causa de los aguaceros intensos en el área de la cuenca del Canal, el nivel de agua en que debe comenzar la descarga de agua puede escogerse cerca del nivel del límite superior del lago. Esto debe estudiarse con mayor detalle, también con relación al uso del agua para la generación de energía eléctrica en la represa de Gatún, y con relación a posibles reservorios de toma de agua dulce en el futuro.